

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Domagoj Delač

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Domagoj Delač

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Posebno se zahvaljujem doc.dr.sc. Ivici Garašiću koji mi je puno pomogao u pisanju ovoga rada svojim stručnim savjetima, literaturom i strpljenjem. Zahvaljujem mu na svojoj podršci koju sam dobio tijekom pisanja ovog rada.

Zahvaljujem se Katedri za zavarene konstrukcije na znanju koje su mu podarili kroz dosadašnji studij. Zahvale idu i mojima najbližima koji su mi pružali potporu tijekom studija.

Domagoj Delač



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **DOMAGOJ DELAČ** Mat. br.: **0035173437**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **KLASIFIKACIJA POSTUPAKA ZAVARIVANJA PREMA HRN EN ISO 4063**

Naslov rada na engleskom jeziku: **CLASSIFICATION OF WELDING PROCESSES ACCORDING TO HRN EN ISO 4063**

Opis zadatka:

Proučiti način podjele i klasifikacije postupaka zavarivanja ovisno o izvoru topline, vrsti dodatnog materijala i načinu prijenosa metala u električnom luku kakav se primjenjuje u okviru norme HRN EN ISO 4063. Analizirati i ostale srodne postupke tj. toplinsko rezanje i lemljenje. Detaljnije proučiti postupke TIG, MIG/MAG i plazma zavarivanja obzirom na nove modificirane inačice koje se primjenjuju u modernoj industrijskoj proizvodnji.

U praktičnom dijelu potrebno je navesti izmjene u novoj normi HRN EN ISO 4063 u odnosu na staro izdanje i komentirati razvoj klasifikacije postupaka zavarivanja, rezanja i lemljenja obzirom na razvoj tehnologije i pojavu novih inačica. Posebno naglasiti dodatne probleme koji se javljaju pri klasifikaciji modificiranih MIG/MAG postupaka te dati prijedloge o dodatnim razinama klasifikacije koje bi jednoznačno definirale pojedine načine MIG/MAG zavarivanja.

Zadatak zadan:
11. studenog 2013.

Rok predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2014.
2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.
2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	1
POPIS SLIKA.....	3
POPIS TABLICA.....	5
SAŽETAK.....	6
1. UVOD.....	7
2. ZAVARIVANJE I SRODNI POSTUPCI – NOMENKLATURA PROCESA I REFERENTNI BROJEVI (ISO 4063 : 2009).....	8
3. OPIS NORME ISO 4063.....	12
4. POVIJESNI RAZVOJ NORME ISO 4063.....	14
4.1. Elektrolučno zavarivanje.....	14
4.2. Elektrootporno zavarivanje.....	16
4.3. Plinsko zavarivanje.....	17
4.4. Zavarivanje pritiskom.....	17
4.5. Zavarivanje zrakama.....	18
4.6. Ostali postupci zavarivanja (7).....	18
4.7. Rezanje i žljebljenje (8).....	19
4.8. Tvrdi lemljenje, meko lemljenje i zavarivačko lemljenje (9).....	19
5. RAZVOJ MIG/MAG ZAVARIVANJA.....	21
5.1. Prijenos materijala kod MIG/MAG zavarivanja.....	21
5.1.2. Prirodni prijenos.....	23

5.1.2. Kontrolirani prijenos.....	29
5.1.2.1. Prijenos metala impulsnim strujama – P.....	30
5.1.2.2. Kontrolirani prijenos kratkim spojevima.....	33
5.1.2.3. Kontrolirani prijenos štrcajućim lukom.....	37
5.2. Kratki pregled modificiranih inačica kod MIG/MAG zavarivanja.....	39
6. RAZVOJ TIG ZAVARIVANJA.....	42
6.1. Razvoj elektroda.....	43
6.2. Razvoj dodatnih materijala – praškom punjene žice za TIG zavarivanje (FC-TIG).....	44
6.3. Visokoučinsko TIG zavarivanje s aktivirajućim praškom.....	46
6.4. K-TIG -visoko penetracijski postupak- „keyhole”.....	47
6.5. Automatizirano TIP TIG zavarivanje.....	49
6.6 Impulsna struja kvadratnog oblika.....	51
6.7. Visoke frekvencije impulsnog zavarivanja.....	52
6.8. Razvoj plinova.....	53
7. RAZVOJ PLAZMA ZAVARIVANJA.....	55
7.1. Impulsne struje kod plazma zavarivanja (VPPA).....	58
7.3. Plazma MIG.....	59
8. ZAKLJUČAK.....	60
9. LITERATURA.....	61

POPIS SLIKA

Slika 5.1. Znanstvena podjela načina prirodnog prijenosa.....	23
Slika 5.2. Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojevima.....	24
Slika 5.3. Dva slučaja odvajanja kapljice kod mješovitog prijelaza.....	26
Slika 5.4. Prijenos metala kod visokoučinskog štrcajućeg luka.....	28
Slika 5.6. Karakteristika impulsne struje.....	29
Slika 5.7. Zavarivanje duplim impulsom.....	30
Slika 5.8. Dinamička karakteristika AC MIG.....	31
Slika 5.9. Tipičan dijagram napon/struja i ciklogram za kratke spojeve.....	32
Slika 5.10. Tipični dijagram napon/struja i ciklogram za kontrolirani prijenos kratkim spojevima.....	33
Slika 5.11. Dinamička karakteristika STT postupka.....	34
Slika 5.12. Dinamička karakteristika FastROOT postupka.....	35
Slika 5.13. Ovisnost jakosti struje o brzini žice za prijenos metala kratkim spojevima i HC MAG Postupkom.....	36
Slika 5.14. Princip rada CMT postupka.....	37
Slika 5.15. Dinamička karakteristika RMT procesa.....	38
Slika 5.16. Usporedba dinamičke karakteristike kratkog spoja i forceARC-a...39	
Slika 6.1. Usporedba penetracije između TIG, FC – TIG i A- TIG s punom žicom.....	45
Slika 6.2. Utjecaj aktivirajućeg praška na protaljivanje kod TIG zavarivanja.....	46
Slika 6.3. Marangonijev tok u kupki zavora.....	47
Slika 6.4. Usporedni prikaz konvencionalnog i K-TIG postupka.....	48

Slika 6.5. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja.....	50
Slika 6.6. Usporedba TIP TIG postupka s vrućom i hladnom žicom.....	51
Slika 6.7. Usporedba formiranja luka kod visokofrekventnog impulsnog TIG zavarivanja i konvencionalnog TIG zavarivanja.....	53
Slika 7.1. Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom.....	56
Slika 7.2. Plazma zavarivanje s prenesenim lukom.....	56
Slika 7.3. Plazma zavarivanje s djelomično prenesenim lukom.....	57
Slika 7.4. Tipična krivulja struje promjenjivog polariteta.....	58
Slika 7.5. Prikaz gorionika za plazma MIG zavarivanje.....	59

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Načini prijenosa.....	12
Tablica 3.2. Dodatni materijali.....	13
Tablica 5.1. Nova IIW klasifikacija prijenosa metala.....	22
Tablica 5.2. Rang modifikacija i njihova ograničenja.....	40
Tablica 6.1. Podjela volframovih elektroda legiranih lantanom prema AWS.....	44

SAŽETAK

Cilj rada je kroz promjene u novoj normi HRN EN ISO 4063 opisati razvoj suvremenih postupaka MIG/MAG, TIG i plazma zavarivanja.

U prvom dijelu rada dan je prijevod nove norme i kraći opis norme koji se odnosi na logiku podjele postupaka i na načine označavanja prijenosa metala, broja elektroda, dodatnog materijala i hibridnih postupaka. Potom je analiziran povijesni razvoj postupaka zavarivanja kroz dosadašnja izdanja norme ISO 4063 s naglaskom na izmjene u posljednjem izdanju naspram prošlog.

U drugom dijelu dan je opis MIG/MAG, TIG i plazma zavarivanja u kontekstu suvremenog razvoja tih postupaka. Detaljniji opis je dan kod MIG/MAG postupaka zavarivanja s obzirom na novu podjelu načina prijenosa metala uz kraće opise nekih postupaka koje primjenjuju nove modificirane načine prijenosa. TIG zavarivanje opisano je prema trendovima razvoja, dok je plazma zavarivanje opisano prema novim varijantama klasificiranim novom normom.

Ključne riječi: *ISO 4063, modificirani načini prijenosa, suvremeni postupci, trendovi, razvoj*

1. UVOD

Zadnje izdanje norme HRN EN ISO 4063 klasificiralo je cijeli niz novih postupaka i varijanti koje su razvijene zahvaljujući napretku izvora struje za zavarivanje i opreme. Veliki napredak do kojeg je došlo u proteklih desetak godina reflektirao se novim izdanjem norme. Ovo izdanje norme tako može preciznije odrediti postupak u kontekstu prijenosa materijala, dodatnog materijala, broja elektroda ili pak hibridnih postupaka koji se uvode u zavarivačku praksu kako bi se iskoristila najbolja svojstva postupaka, a neutralizirali nedostaci. S ovim izdanjem norme može se puno jasnije odrediti postupak i izbjeći pojava preklapanja i nejasna tumačenja. Tako se do ove norme kod MIG/MAG zavarivanja trebao navesti samo postupak čime se nije definirao prijenos materijal koji igra veoma značajnu ulogu, takvu da iako je riječ o varijanti istog procesa možemo praktično govoriti o drugom postupku. Na ovo izdanje norme utjecala je i sve veća težnja za automatizacijom procesa pa se definiranjem dodatnog materijala, odnosno hladne i tople žice kod npr. TIG zavarivanja daje jednoznačna oznaka automatiziranog procesa. Potreba za sve bržim i produktivnijim postupcima razvila je brojne procese koji koriste više od jedne elektrode, kao što su npr. zavarivanje s dvije žice ili nekoliko kod EPP postupaka ili pak tandem zavarivanje kod MIG/MAG procesa. Novom normom zamjetno je definiranje sve više procesa koji koriste praškom punjene žice ili pak trakaste elektrode.

Ovim radom obuhvaćen je samo mali dio trendova i varijanti novih postupaka i to kod grupa postupaka koje su najviše izmijenjene novim izdanjem norme

2. ZAVARIVANJE I SRODNI POSTUPCI – NOMENKLATURA PROCESA I REFERENTNI BROJEVI (ISO 4063 : 2009)

1 Elektrolučno zavarivanje

- 11 Elektrolučno zavarivanje bez zaštitnog plina
 - 111 Ručno elektrolučno zavarivanje
 - 112 Gravitacijsko zavarivanje obloženom elektrodom
 - 114 Elektrolučno zavarivanje samozaštitom praškom punjenom žicom
- 12 Zavarivanje pod zaštitom praška
 - 121 Zavarivanje sa žicom pod zaštitom praška
 - 122 Zavarivanje s trakom pod zaštitom praška
 - 124 Zavarivanje pod zaštitom praška s dodatkom metalnog praška
 - 125 Zavarivanje pod zaštitom praška s praškom punjenom žicom
 - 126 Zavarivanje pod zaštitom praška s trakastom elektrodom punjenom praškom
- 13 Elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom sa zaštitnim plinom
 - 131 MIG zavarivanje punom žicom
 - 132 MIG zavarivanje praškom punjenom žicom
 - 133 MIG zavarivanje metalnim prahom punjenom žicom
 - 135 MAG zavarivanje krutom žicom
 - 136 MAG zavarivanje praškom punjenom žicom
 - 138 MAG zavarivanje metalnim prahom punjenom žicom
- 14 Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom
 - 141 TIG zavarivanje punom žicom ili šipkom
 - 142 TIG zavarivanje bez dodatnog materijala
 - 143 TIG zavarivanje s praškom punjenom žicom ili šipkom
 - 145 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i pune žice ili šipke
 - 146 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i praškom punjene žice ili šipke
 - 147 Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom primjenom aktivnog plina (TAG zavarivanje)
- 15 Elektrolučno zavarivanje plazmom
 - 151 Plazma MIG zavarivanje
 - 152 Plazma zavarivanje s praškom
 - 153 Plazma zavarivanje s prenesenim lukom
 - 154 Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom
 - 155 Plazma zavarivanje s djelomično prenesenim lukom
- 185 Zavarivanje rotirajućim električnim lukom

2 Elektrootporno zavarivanje

- 21 Točkasto zavarivanje
 - 211 Indirektno točkasto zavarivanje
 - 212 Direktno točkasto zavarivanje
- 22 Šavno zavarivanje
 - 221 Preklopno šavno zavarivanje
 - 222 Šavno zavarivanje pritiskom

- 223 Preklopno šavno zavarivanje s pripremom
- 224 Šavno zavarivanje sa žicom
- 225 Sučeljeno šavno zavarivanje s folijom
- 226 Šavno zavarivanje s trakom
- 23 Bradavičasto zavarivanje
 - 231 Indirektno bradavičasto zavarivanje
 - 232 Direktno bradavičasto zavarivanje
- 24 Zavarivanje iskrenjem
 - 241 Zavarivanje iskrenjem s predgrijavanjem
 - 242 Zavarivanje iskrenjem bez predgrijavanja
- 25 Sučeljeno elektrootporno zavarivanje
- 26 Elektrootporno zavarivanje svornjaka
- 27 Visokofrekventno elektrootporno zavarivanje
- 29 Ostali procesi elektrootpornog zavarivanja

3 Plinsko zavarivanje

- 31 Zavarivanje kisikom i gorivim plinom
 - 311 Zavarivanje kisikom i acetilenom
 - 312 Zavarivanje kisikom i propanom
 - 313 Zavarivanje kisikom i vodikom

4 Zavarivanje pritiskom

- 41 Ultrazvučno zavarivanje
- 42 Zavarivanje trenjem
 - 421 Zavarivanje trenjem konstantnom rotacijom
 - 422 Zavarivanje trenjem inercijom
 - 423 Zavarivanje svornjaka trenjem
- 43 Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom
- 44 Zavarivanje velikom mehaničkom energijom
 - 441 Zavarivanje eksplozijom
 - 442 Zavarivanje magnetskim impulsom
- 45 Difuzijsko zavarivanje
- 47 Plinsko zavarivanje pritiskom
- 48 Hladno zavarivanje pritiskom
- 49 Vruće zavarivanje pritiskom

5 Zavarivanje zrakama

- 51 Zavarivanje elektronskim mlazom
 - 511 Zavarivanje elektronskim mlazom u vakuumu
 - 512 Zavarivanje elektronskim mlazom u atmosferi
 - 513 Zavarivanje elektronskim mlazom s dodatkom zaštitnog plina
- 52 Zavarivanje laserom
 - 521 Zavarivanje laserom u krutom stanju
 - 522 Zavarivanje plinskim laserom
 - 523 Zavarivanje diodnim laserom

7 Ostali postupci zavarivanja

- 71 Aluminotermijsko zavarivanje
- 72 Zavarivanje pod troskom
 - 721 Zavarivanje pod troskom trakastom elektrodom
 - 722 Zavarivanje pod troskom žičanom elektrodom
- 73 Elektrolinsko zavarivanje
- 74 Indukcijsko zavarivanje
 - 741 Indukcijsko sučeljeno zavarivanje
 - 742 Indukcijsko šavno zavarivanje
 - 743 Indukcijsko visokofrekventno zavarivanje
- 75 Zavarivanje svjetlosnim zračenjem
 - 753 Infracrveno zavarivanje
- 78 Elektrolučno zavarivanje svornjaka
 - 783 Zavarivanje svornjaka s odmakom luka uz primjenu keramičkog prstena ili zaštitnog plina
 - 784 Zavarivanje svornjaka s kratkotrajnim odmakom luka
 - 785 Zavarivanje svornjaka s odmakom luka uz kondenzatorsko izbijanje
 - 786 Zavarivanje svornjaka uz kondenzatorsko izbijanje i uspostavljanje luka na vrhu svornjaka
 - 787 Zavarivanje svornjaka s taljivim prstenom uz odmak električnog luka

8 Rezanje i žljebljenje

- 81 Rezanje plamenom
- 82 Elektrolučno rezanje
 - 821 Elektrolučno rezanje uz primjenu zraka
 - 822 Elektrolučno rezanje uz primjenu kisika
- 83 Rezanje plazmom
 - 831 Plazma rezanje s oksidirajućim plinom
 - 832 Plazma rezanje bez oksidirajućeg plina
 - 833 Plazma rezanje zrakom
 - 834 Visoko precizno plazma rezanje
- 84 Rezanje laserom
- 86 Žljebljenje plamenom
- 87 Elektrolučno žljebljenje
 - 871 Elektrolučno žljebljenje uz primjenu zraka
 - 872 Elektrolučno žljebljenje uz primjenu kisika
- 88 Plazma žljebljenje

9 Tvrdo lemljenje, meko lemljenje i zavarivačko lemljenje

- 91 Tvrdo lemljenje s lokalnim zagrijavanjem
 - 911 Tvrdo lemljenje infracrvenim zračenjem
 - 912 Plameno tvrdo lemljenje
 - 913 Tvrdo lemljenje laserskom zrakom
 - 914 Tvrdo lemljenje elektronskim mlazom
 - 916 Indukcijsko tvrdo lemljenje

- 918 Elektrootporno tvrdo lemljenje
- 919 Difuzijsko tvrdo lemljenje
- 92 Tvrdo lemljenje s cjelovitim zagrijavanjem
 - 921 Tvrdo lemljenje u peći
 - 922 Tvrdo lemljenje u vakuumu
 - 923 Tvrdo lemljenje uranjanjem u kupku
 - 924 Tvrdo lemljenje u solnoj kupki
 - 925 Tvrdo lemljenje u kupki s praškom
 - 926 Tvrdo lemljenje potapanjem
- 93 Ostali postupci tvrdog lemljenja
- 94 Meko lemljenje s lokalnim zagrijavanjem
 - 941 Meko lemljenje infracrvenim zračenjem
 - 942 Plameno meko zavarivanje
 - 943 Meko lemljenje lemlicom
 - 944 Meko lemljenje povlačenjem
 - 945 Lasersko meko lemljenje
 - 946 Indukcijsko meko lemljenje
 - 947 Ultrazvučno meko lemljenje
 - 948 Meko elektrootporno lemljenje
 - 948 Difuzijsko meko lemljenje
- 95 Meko lemljenje s cjelovitim zagrijavanjem
 - 951 Meko lemljenje na valu
 - 953 Meko lemljenje u peći
 - 954 Meko lemljenje u vakuumu
 - 955 Meko lemljenje uranjanjem
 - 957 Meko lemljenje u solnoj kupki
- 96 Ostali procesi mekog lemljenja
- 97 Zavarivačko lemljenje
 - 971 Plinsko zavarivačko lemljenje
 - 972 Elektrolučno zavarivačko lemljenje
 - 973 Elektrolučno zavarivačko lemljenje sa zaštitnim plinom
 - 974 Elektrolučno zavarivačko lemljenje volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom
 - 975 Elektrolučno zavarivačko lemljenje plazmom
 - 976 Lasersko zavarivačko lemljenje
 - 977 Zavarivačko lemljenje elektronskim snopom

3. OPIS NORME ISO 4063

Norma Zavarivanje i srodni postupci – nomenklatura procesa i referentni brojevi (ISO 4063 : 2009) klasificira za svaki postupak referentni broj. Prema tom referentnom broju točno se zna o kojem postupku je riječ. Referentni broj za svaki postupak ima maksimalno 3 znamenke. Znamenka označava redom glavnu grupu procesa, grupu i podgrupu.

Postupci su sveukupno podijeljeni u 8 glavnih grupa procesa. U grubo, norma se može podijeliti na grupe postupka zavarivanje te grupe srodnih postupaka, odnosno toplinskog rezanja i žljebljenja te lemljenja. Grupe postupka zavarivanja međusobno se razlikuju prema izvoru topline. Kod zavarivanja razlikujemo dvije glave skupine zavarivanja, zavarivanje taljenjem (toplinska energija) i zavarivanje pritiskom (toplinsko-mehanička i mehanička energija).

Kod glavne grupe procesa sa znamenkom 1 izvor topline je električni luk. Kod grupe s brojem 2 riječ je o postupcima kod kojih se metal zagrijava i tali topline koja nastaje uslijed otpora prolazom električne energije. Grupa s brojem 3 kao izvor topline koristi plinski plamen koji oslobađa toplinu izgaranjem goriva koje sadrži kemijsku energiju. Kod grupe procesa s brojem 4 materijal se spaja pritiskom, dok se kod grupe 5 koristi visokoenergetska fokusirana zraka. Postupci iz grupe 7 smješteni su u zasebnu grupu jer se ne mogu smjestiti u niti jednu od postojećih grupa, a njihova upotreba u praksi je veoma ograničena.

Kada se zahtjeva puno određenje za zavarivački proces, sljedeća struktura mora biti zadovoljena: broj međunarodnog standarda, odvojenog crticom od referentnog broja postupka. Primjer: 111, Ručno elektrolučno zavarivanje: ISO 4063 – 111

Prema novom izdanju norme moguće je označiti i varijante postupka prema prijenosu metala ili brojem elektroda. Za procese kod kojih su mogući različiti načini prijenosa, prijenosi se mogu označiti slovom prema tablici 1.

Tablica 3.1. Načini prijenosa [1]

Način	Naziv
D	Prijenos metala kratkim spojevima (<i>eng Short-circuit transfer (dip transfer)</i>)
G	Prijenos metala mješovitim lukom (<i>eng. Globular transfer</i>)
S	Prijenos metala štrcajućim lukom (<i>eng. Spray transfer</i>)
P	Prijenos metala impulsnim strujama (<i>eng. Pulsed transfer</i>)

Broj elektroda pri upotrebi više od jedne može se označiti brojem. Primjer, 131, MIG zavarivanje punom žicom s dvije elektrode: ISO 4063 – 131–2

Dodatna oznaka koja se može pripisati procesu koji koristi dodatni materijal opcija je između hladne ili vruće žice. Oznaka je prikazana u tablici 2.

Tablica 3.2. Dodatni materijali [1]

Način	Naziv
C	Hladna žica (<i>eng. cold wire</i>)
H	Vruća žica (<i>eng. hot wire</i>)

Kada se simultano koristi više od jednog postupka u procesnom prostoru, hibridni postupci, postupke je moguće opisati za svaki proces odvojeno s plus simbolom (+). Npr. upotreba lasera i plazma zavarivanja zajedno bila bi označena 522 + 15

Uz normu su još dodani i aneks A i aneks B. Aneks A sadrži popis procesa koji su se koristi u prošlim izdanjima norme, ali koji su zamijenjeni ili zastarjeli. Oni se smiju koristiti samo u specijalnim slučajevima ili staroj dokumentaciji.

Aneks B sadrži akronime i kratice za postupke koji se najčešće koriste u engleskom govornom području. Oni su povezani s referentnim brojem postupka na koji se odnose [1].

4. POVIJESNI RAZVOJ NORME ISO 4063

Zbog mnogih prednosti te značajnih ušteda nasuprot drugih proizvodnih tehnologija i postupaka spajanja zavarivačka tehnologija je mnogo napredovala. Razvojem tehnologije zavarivanja došlo je do naglog razvoja znatnog broja postupaka i varijanti postupaka zavarivanja čime se pojavila potreba za detaljnom klasifikacijom. Iako je i prije postojalo određenih pokušaja sustavne podjele i sređivanja, prva uspješna klasifikacija, s nomenklaturom, bila je 1978. standardom ISO 4063. Američko društvo za zavarivanje (AWS) izdalo je standard pod nazivom: *"Zavarivanje, tvrdo lemljenje, zavarivačko lemljenje i meko lemljenje metala; Popis procesa za simboličko prikazivanje na crtežima."*

Do današnjeg dana objavljeno je 5 izdanja, ali je posljednje izdanje iz 2011. zapravo samo korekcija 4. izdanja iz 2009. u nekoliko numeričkih oznaka vezanih za zavarivačko lemljenje u grupi s referentnim brojem 9. Prvo izdanje dijelilo je zavarivačke procese u 5 osnovnih grupa, dok u današnjem postoji 6 osnovnih grupa zavarivanja, elektrolučno zavarivanje (1), elektrootporno zavarivanje (2), plinsko zavarivanje (3), zavarivanje pritiskom (4), zavarivanje zrakama (5), ostali procesi zavarivanja (7). Uz procese zavarivanja norma obrađuje i ostale srodne postupke koji su svrstani u dvije osnovne grupe: rezanje i žljebljenje (8) te tvrdo lemljenje, meko lemljenje i zavarivačko lemljenje (9).

4.1. Elektrolučno zavarivanje

Ova grupa podijeljena je u 6 podgrupa prema normi iz 2009. Kako su elektrolučni postupci doživjeli veliki napredak i razvijene su mnoge inačice ovih postupaka tako se i najveće promjene u odnosu na prošlo izdanje iz 1998. odnose na procese iz ove grupe.

Postupci iz ove grupe oduvijek su najkorišteniji i najrašireniji tako da je i sveobuhvatni povijesni pregled najzanimljiviji za ovu grupu. Prema prvom izdanju ISO 4063 iz 1978., postupci su bili podijeljeni prema sljedećoj nomenklaturi:

1 Elektrolučno zavarivanje

11 Zavarivanje bez zaštitnog plina

111 Elektrolučno zavarivanje metala obloženom elektrodom

112 Gravitacijsko elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom

113 Elektrolučno zavarivanje metala golom žicom

114 Elektrolučno zavarivanje metala praškom punjenom elektrodom

115 Elektrolučno zavarivanje metala obloženom žicom

118 Zavarivanje pod letvom

12 Elektrolučno zavarivanje pod praškom

- 121 EPP sa žičanom elektrodom
- 122 EPP s trakastom elektrodom
- 13 Elektrolučno zavarivanje metala sa zaštitnim plinom
 - 131 MIG zavarivanje
 - 132 MAG zavarivanje; Elektrolučno zavarivanje metala sa zaštitom ne-inertnim plinom
 - 136 Elektrolučno zavarivanje metala praškom punjenom žicom sa zaštitom ne-inertnim plinom
- 14 Zavarivanje netaljivom elektrodom sa zaštitnim plinom
 - 141 TIG zavarivanje
 - 149 Zavarivanje pod zaštitom atomiziranog vodika
- 15 Elektrolučno zavarivanje plazmom
- 18 Ostali postupci elektrolučnog zavarivanja
 - 181 Elektrolučno zavarivanje ugljenom elektrodom
 - 185 Zavarivanje rotirajućim električnim lukom

Drugo izdanje iz 1990. nije donijelo neke značajnije promjene. Uvelo je oznaku 101 Elektrolučno zavarivanje metala, plazma zavarivanje je dobilo podproces 151 Plazma MIG zavarivanje, dok je MIG proces razdvojen kao MAG u prvom izdanju na 131 Elektrolučno zavarivanje metala s inertnim plinom i 137 Elektrolučno zavarivanje metala praškom punjenom žicom sa zaštitom inertnim plinom.

Treće izdanje iz 1998. godine povuklo je postupke iz grupe 11 s brojem: 113 Zavarivanje golom elektrodom, 115 Zavarivanje obloženom žicom 118 Zavarivanje pod letvom te još postupke 149 Zavarivanje pod zaštitom atomiziranog vodika i 181 Elektrolučno zavarivanje ugljenom elektrodom.

Najviše je promjena došlo u grupi 12 Elektrolučno zavarivanje pod praškom koja je detaljno raspisana:

- 121 EPP s jednom žičanom elektrodom
- 122 EPP s trakastom elektrodom
- 123 EPP sa višestrukim žičanim elektrodama
- 124 EPP s dodatkom metalnog praška
- 125 EPP s praškom punjenom elektrodom

Plazma zavarivanju je dodan još jedan potproces: 152 Plazma zavarivanje s praškom. U odnosu na drugo izdanje iz 1990. ova grupa je imala relativno male promjene što dovoljno govori do kakvog je uspona došlo u proteklih 10-ak godina.

Nove brojčane oznake kod postupaka elektrolučnog zavarivanja

Iz ove grupe novim izdanjem najviše je promjena došlo kod MIG/MAG, TIG i plazma zavarivanja. Pritom se ističe uvođenje trakastih elektroda i to punih i praškom punjenih. Povučene su oznake 101 Elektrolučno zavarivanje metala i oznaka 123 EPP sa višestrukim žičanim elektrodama.

Kod MIG/MAG zavarivanja postupak 137 Elektrolučno zavarivanje metala praškom punjenom žicom sa zaštitom inertnim plinom dobio je novi broj 132, tako da su uvedene tri nove oznake:

132 MIG zavarivanje praškom punjenom elektrodom

133 MIG zavarivanje metalnim prahom punjenom žicom

138 MAG zavarivanje metalnim prahom punjenom žicom

Kod TIG postupka uvedeno je nekoliko nadopuna i to:

142 TIG zavarivanje bez dodatnog materijala

143 TIG zavarivanje s praškom punjenom žicom ili šipkom

145 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i žice ili šipke

146 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i pune žice ili šipke

147 Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom primjenom aktivnog plina (TAG zavarivanje)

Kod plazma zavarivanja uvedeni su sljedeće oznake:

153 Plazma zavarivanje s prenesenim lukom

154 Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom

155 Plazma zavarivanje s djelomično prenesenim lukom [2]

4.2. Elektrootporno zavarivanje

Ova grupa procesa nije imala značajnije promjene od prvog izdanja koje je imalo 6 grupa, a izmjene su se uglavnom odnosile na detaljniju podjelu grupa i podgrupa. Ova grupa procesa podijeljena je prema posljednjem izdanju na 8 grupa: 21 Točkasto zavarivanje, 22 Šavno zavarivanje, 23 Bradavičasto zavarivanje, 24 Zavarivanje iskrenjem, 25 Sučeljeno elektrootporno zavarivanje, 26 Elektrootporno zavarivanje svornjaka, 27 Visokofrekventno elektrootporno zavarivanje, 29 Ostali procesi elektrootpornog zavarivanja.

Nove brojčane oznake kod postupaka elektrootpornog zavarivanja

Promjene u posljednjem izdanju odnose se na detaljniju podjelu šavnog elektrootpornog zavarivanja koje je dobilo dvije nove podgrupe:

223 Preklopno šavno zavarivanje s pripremom

224 Šavno zavarivanje sa žicom

Elektrootporno zavarivanje svornjaka premješteno je iz grupe procesa 7 Ostali procesi zavarivanja u kojoj je imalo oznaku 782 u ovu grupu procesa u kojoj je postala samostalna grupa s oznakom 26.

Visokofrekventno elektrootporno zavarivanje postalo je također samostalna grupa i dobilo je oznaku 27 nakon što je premješteno iz grupe 29 u kojoj je imalo oznaku 291. [2]

4.3. Plinsko zavarivanje

Ova grupa procesa je nepromijenjena od trećeg izdanja iz 1998. kada je izbačena grupa 32 Zavarivanje zrakom i gorivim plinom. S njom iz upotrebe su istisnute i podgrupe 321 Zavarivanje zrakom i acetilenom te 322 Zavarivanje zrakom i propanom. Ova grupa procesa je tako ostala ista do danas. [3]

4.4. Zavarivanje pritiskom

Ova grupa procesa bila je ista u prva dva izdanja, a činilo ju je 8 grupa koje su i danas zastupljene osim grupe 43 Kovačko zavarivanje koja je u trećem izdanju izbačena.

Nove brojčane oznake kod postupaka zavarivanja pritiskom

Četvrto izdanje donijelo je neke promjene i uvelo je nove postupke te detaljniju klasifikaciju. Sveukupno je danas 9 grupa.

Uvedene su oznake sljedećih grupa:

43 Zavarivanje trenjem rotirajućim alatom

49 Vruće zavarivanje pritiskom

Grupa 42 Zavarivanje trenjem detaljnije je opisana pa su tako uvedene sljedeće podgrupe:

421 Zavarivanje trenjem konstantnom rotacijom

422 Zavarivanje trenjem inercijom

423 Zavarivanje svornjaka trenjem

Grupa 44 Zavarivanje velikom mehaničkom energijom dodatno je podijeljena podgrupom:

442 Zavarivanje magnetskim impulsom [2]

4.5. Zavarivanje zrakama

U prva dva izdanja ova grupa procesa smještena je u grupu 7 Ostali postupci zavarivanja. Razvojem koji je uslijedio postavljeni su zahtjevi da se ovu grupu procesa izdvoji kao samostalnu grupu. Trećim izdanjem ova grupa procesa dobila je oznaku 5 i podijeljena je u dvije osnovne grupe: 51 Zavarivanje elektronskim mlazom i 52 Zavarivanje laserom

Nove brojčane oznake kod postupaka zavarivanja zrakama

Objekte grupe su detaljnije podijeljene. Kod grupe 51 uvedena je oznaka:

513 Zavarivanje elektronskim mlazom s dodatkom zaštitnog plina,

dok je kod grupe 52 uvedena oznaka:

523 Zavarivanje diodnim laserom [2]

4.6. Ostali postupci zavarivanja (7)

Procese iz ove grupe teško je smjestiti u specifične grupe zbog karaktera procesa tako da su svi objedinjeni pod oznakom 7. Razvojem pojedinih postupaka iz ove grupe i njihovom širom primjenom za očekivati je da bi se pojedini procesi mogli izdvojiti u zasebne grupe kao što je to bio slučaj s grupom procesa 5 Zavarivanje zrakama. U prva dva izdanja bilo je zastupljeno 8 grupa, a do prvih promjena dolazi u 3. izdanju.

Već spomenutom promjenom izdvojen je dio postupaka u grupu 5. Postupak pod brojem 781 Elektrolučno zavarivanje svornjaka ugašen je jer je podijeljen u 5 različitih procesa (postupci u rangu oznaka 783 -787). Uvedena je i oznaka 788 Zavarivanje svornjaka trenjem. Indukcijsko zavarivanje (74) podijeljeno je na sučeljeno (741) i šavno (742).

Iz norme je izostavljen postupak s brojem 752 Zavarivanje reflektirajućim lukom jer je označen kao zastario proces.

Nove brojčane oznake kod ostalih postupaka zavarivanja

Iz aktualnog standarda maknut je proces 77 Zavarivanje udarom. Premješteni su procesi 782 Elektrootporno zavarivanje svornjaka (označen sada brojem 26) te 788 Zavarivanje svornjaka trenjem (označen brojem 423).

Grupa 72 Zavarivanje pod troskom sad je podijeljena na:

721 Zavarivanje pod troskom trakastom elektrodom

722 Zavarivanje pod troskom žičanom elektrodom

Grupa 74 Indukcijsko zavarivanje dobila je još jednu podgrupu:

743 indukcijsko visokofrekventno zavarivanje [2]

4.7. Rezanje i žljebljenje (8)

Treće izdanje standarda iz 1998. predstavilo je nomenklaturni sistem za ove postupke pod brojem 8. Do tada ovi postupci nisu bili obuhvaćeni ovim standardom. Ova grupa postupaka podijeljena je u svojoj prvoj klasifikaciji u 8 grupa koje su ostale iste i u aktualnom izdanju norme.

Nove brojčane oznake kod rezanja i žljebljenja

Jedine promjene u izdanju 2009. koje se odnose na ovu grupu postupaka vezane su za detaljnu podjelu rezanja plazmom (83). Postupci iz ove grupe podijeljeni su na sljedeći način:

- 831 Plazma rezanje s oksidirajućim plinom
- 832 Plazma rezanje bez oksidirajućeg plina
- 833 Plazma rezanje zrakom
- 834 Visoko precizno plazma rezanje [2]

4.8. Tvrdo lemljenje, meko lemljenje i zavarivačko lemljenje (9)

U prvom standardu 1978. ova grupa procesa bila je podijeljena na 5 osnovnih grupa, no s današnjim izdanjem grupa je doživjela detaljniju podjelu grupa i mnogo promjena te uvođenje novih postupaka.

U drugom izdanju umjesto 953 Meko lemljenje trenjem uvedeno je pod tim brojem abrazijsko meko lemljenje. te je dodana oznaka 956 Meko lemljenje povlačenjem.

U trećem izdanju povučene su sljedeće oznake zbog zastarjelosti procesa: 917 Ultrazvučno tvrdo lemljenje, 923 Tvrdo lemljenje trenjem i 953 Abrazijsko meko lemljenje

Nove brojčane oznake kod tvrdog, mekog i zavarivačkog lemljenja (9)

Tvrdo i meko zavarivanje podijeljeni su u dvije osnovne grupe: s lokalnim zagrijavanjem i cjelovitim zagrijavanjem.

Kod tvrdog lemljenja s lokalnim zagrijavanjem (91) uvedeni su sljedeći postupci:

- 913 Tvrdo lemljenje laserskom zrakom
- 914 Tvrdo lemljenje elektronskim mlazom

Dok su postupci 913 Tvrdo lemljenje u peći, 914 Tvrdo lemljenje uranjanjem i 915 Tvrdo lemljenje u solnim kupkama dobili nove oznake i premješteni su u grupu 92 Tvrdo lemljenje s cjelovitim zagrijavanjem. U tu grupu dodana su dva nova postupka:

- 925 Tvrdo lemljenje u kupki s praškom
- 926 Tvrdo lemljenje potapanjem

Sljedeći postupci iz ove grupe dobili su nove oznake: 921 Tvrdo lemljenje u peći, 923 Tvrdo lemljenje uranjanjem u kupku, 924 Tvrdo lemljenje u solnoj kupki, a tvrdo lemljenje u vakuumu je dobilo broj 922 umjesto dotadašnjeg 924.

Kod mekog lemljenja s lokalnim zagrijavanjem (94) uveden je jedan novi postupak:

945 Lasersko meko lemljenje

Ostali postupci iz ove grupe koji su promijenili brojeve su: meko lemljenje lemlicom koje je dobilo broj 943 umjesto dotadašnjeg 952, a tvrdo lemljenje povlačenjem postalo je 944 umjesto 956.

Uvođenjem oznake 95 Meko lemljenje s cjelovitim zagrijavanjem sljedeći postupci su dobili nove oznake: 953 Meko lemljenje u peći umjesto dotadašnje 943, 955 Meko lemljenje uranjanjem umjesto 944 te 957 Meko lemljenje u solnoj kupki umjesto 945.

Također, zavarivačko lemljenje je bogatije za 5 novih postupaka, čiji su brojevi korigirani novim izdanjem iz 2011. jer su imali drugu znamenku 8 umjesto 7, tako da danas glase:

973 Elektrolučno zavarivačko lemljenje sa zaštitom plina

974 Elektrolučno zavarivačko lemljenje volframovom elektrodom sa zaštitnim plinom

975 Elektrolučno zavarivačko lemljenje plazmom

976 Lasersko zavarivačko lemljenje

977 Zavarivačko lemljenje elektronskim snopom [2]

5. RAZVOJ MIG/MAG ZAVARIVANJA

Elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom sa zaštitnim plinom (13) ima sve širu primjenu i sve se više koristi za mnoge zahtjeve zbog svoje svestranosti. Danas su postupci iz ove grupe procesa jedni od najkorištenijih postupaka u zavarivačkoj industriji koji svoj primat mogu zahvaliti mnogobrojnim prednostima te nerijetko zamjenjuju ostale postupke. Mogu se koristiti za zavarivanje svih komercijalnih metala i legura u svim pozicijama, imaju velike brzine zavarivanja i stope depozita, imaju jako dobru zaštitu metala zavara, mogućnost robotizacije, visoka svojstva zavara zbog kontinuiranosti procesa itd.

Jedna od najvećih prednosti ovog procesa koja omogućuje tako snažan razvoj, prijenos je metala u električnom luku. Razvojem izvora struje i opreme danas je moguće kontrolirati proces odvajanja kapljice metala i njegov transfer u kupku zavara što predstavlja nove izazove za jednoznačnu klasifikaciju procesa. Osim konvencionalnih prijenosa koji se ovi izdanjem norme po prvi put jasno definiraju, danas je moguće definirati više načina prijenosa metala, prvenstveno u području kontroliranog prijenosa. [3]

5.1. Prijenos materijala kod MIG/MAG zavarivanja

Oduvijek su struja i napon bili glavni faktori koji određuju način prijenosa materijala u električnom luku. Povećanjem vrijednosti ovih parametara mijenjao se i način prijenosa materijala kod konvencionalnih AC i DC izvora struje za zavarivanje. Prva klasifikacija načina prijenosa materijala u električnom luku, donesena od Međunarodnog instituta za zavarivanje (*eng. International Institute of Welding, IIW*) 1976., obuhvaćala je područja prijenosa metala kratkim spojevima, mješovitim lukom i štrcajućim lukom, područja koja danas spadaju pod prirodan prijenos. Impulsno zavarivanje novom klasifikacijom spada pod kontrolirani prijenos materijala slobodnim letom i to u području niskih i visokih parametara zavarivanja zahvaljujući visokim razinama impulsne struje.

Napretkom u posljednjih 10 godina drastično se promijenio pristup u prijenosu materijala i dotadašnja klasifikacija više nije odgovarala prijenosu kod novih postupaka zavarivanja. Unatoč svojem praktičnom značaju, ova podjela ne obuhvaća najnovije vrste kontroliranog prijenosa materijala. Prema novom prijedlogu klasifikacije predloženom od strane IIW-a 2007. [4] definirana su tri glavna područja prijenosa metala kod elektrolučnog zavarivanja metalnom taljivom elektrodom sa zaštitnim plinom:

1. prirodni prijenos,
2. kontrolirani prijenos,
3. modificirano (prošireno) područje prijenosa.

Svakom ovom području pripadaju određene grupe koje obuhvaćaju načine prijenosa materijala sa sličnim karakteristikama. Način prijenosa dodatnog materijala je karakteristično ponašanje kapljice u električnom luku tijekom prijenosa kod MIG/MAG zavarivanja.

Međutim, tijekom diskusija o novoj klasifikaciji prijenosa materijala istakla su se dva pristupa. Dio autora je predlagao što jednostavniju klasifikaciju, dok je dio težio sveobuhvatnoj i detaljnijoj, to jest, znanstvenoj klasifikaciji. Prvi pristup je usredotočen na najširu zavarivačku zajednicu kako bi primijenila novu klasifikaciju za praktičnu uporabu, ciljajući najviše na potrebe industrije, ne pokrivajući u njoj cijeli raspon načina prijenosa metala. Drugi pak pristup stremlji tome da se pokriju zamršeni fizikalni aspekti prijenosa metala. Međutim, na kraju je IIW predložio jednostavniju klasifikaciju [5]. U tablici 2. prikazana je nova klasifikacija načina prijenosa metala, a koja obuhvaća prirodno i kontrolirano područje prijenosa metala.


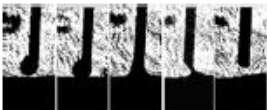
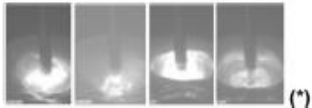
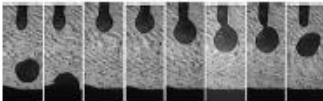

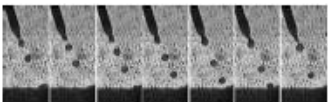
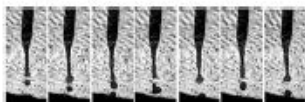


Tablica 5.1. Nova IIW klasifikacija prijenosa metala [6]

	Prirodni prijenos		Podgrupa		Kontrolirani prijenos
A	Kratkim spojevima	A1	Kratkim spojevima	A1.1	Kratkim spojevima
B	Mješovitim lukom	B1	Mješovitim		
		B2	Odbojnim		
C	Štrcajućim lukom	C1	Standardnim	C1.1	Kontroliranim impulsom
		C2	Visokoučinskim	C1.2	Kontroliranim štrcanjem
		C3	Rotirajućim		

5.1.2. Prirodni prijenos

U ovo područje spadaju prijenosi koji se koriste kod konvencionalnih MIG/MAG postupaka, ali i visokoučinskih postupaka (postupci s brzinom dodavanja žice većom od 15 m/min). Novim izdanjem norme ISO 4063 : 2009 po prvi put se klasificiraju i prijenosi dodatnog materijala. Klasifikacija prijenosa metala obuhvaća konvencionalne prijenose s dugom praktičnom upotrebom.

Ovi načini prijenosa imaju snažan utjecaj na performance zavarivačkog procesa i određeni su operacijskim parametrima. Prijenosi metala u ovom području funkcija su, prije svega, struje i napona. Izlaskom iz standardnih parametara prelazimo u područje visokoučinskih postupaka koji se baziraju na dugačkom slobodnom kraju žice [7]. Za sve načine je karakteristično da se ponašaju „prirodno“, a to znači da se ne odvijaju uz pomoć dodatnih električnih parametara ili kontrole dodavanja žice. Na slici 5.1. prikazana je detaljnija podjela načina prijenosa metala prema [5] s fizikalnim silama koje su dominantne za određene procese. Takva podjela karakteristična je za znanstveni pristup.

Group of modes	Transfer mode	Appearance	Main governing force (effect)
Contact transfer	Short-circuiting		Surface tension and electromagnetic pinch effect
	Bridging		Surface tension
	Forced short-circuiting	 (*)	Strongly pronounced electromagnetic pinch effect
Free-flight transfer	Globular		Gravitational force
	Repelled globular		Gravitational force and repelling forces
	Projected spray		Electromagnetic force
	Streaming spray		Electromagnetic force
	Rotating spray		Electromagnetic force
	Explosive		Electromagnetic force and chemical reactions

Slika 5.1. Znanstvena podjela načina prirodnog prijenosa [5]

Prijenos materijala kratkim spojevima – D

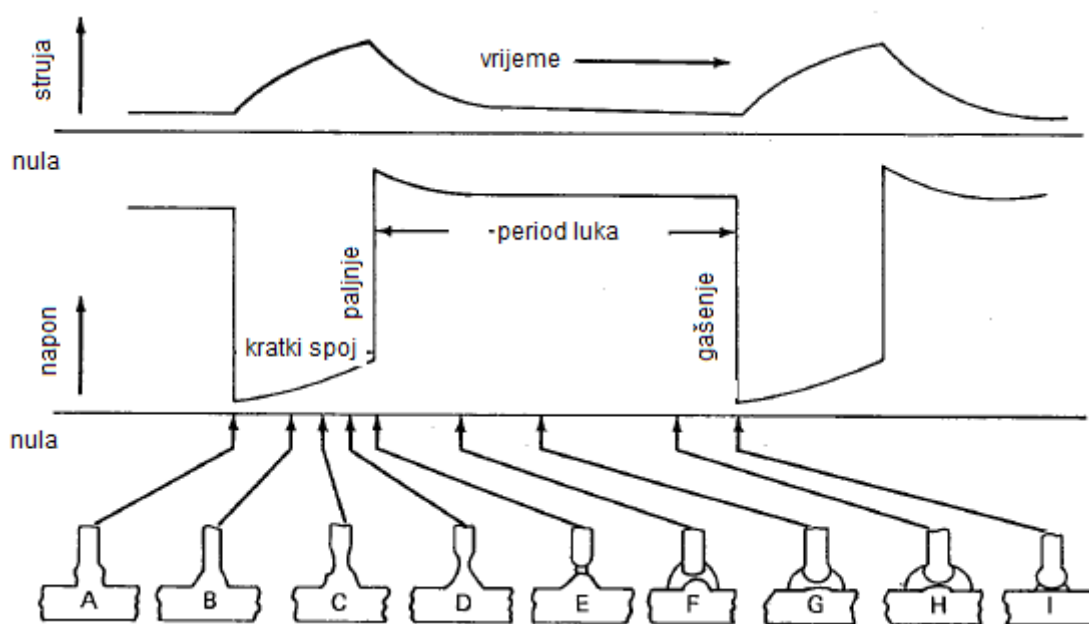
Ovaj prijenos označuje se s D (*eng. dip transfer*). Kratkim spojevima metal se prenosi s malim unosom energije uz male struje zavarivanja i niske napone električnog luka (13-21 V, 50-170 A). Metal se prenosi s elektrode na radni komad samo za vrijeme dok je elektroda u kontaktu s kupkom zavara. Frekvencija kojom elektroda dotiče kupku zavara je od 20 do 200 puta u sekundi.

Slijed događaja kod prijenosa metala uz odgovarajuće struje i napone prikazan je na slici 5.2. Kako žica prilazi metalu, dolazi do kratkog spoja, luk nestaje, a struja počinje rasti (A). U tom periodu stvara se tekući rastaljeni most između žice i kupke zavara koji se povećava kako se kapljica usisava u kupku zavara zbog površinskih napetosti. Kako struja kratkog spoja u tom

trenutku nije jako izražena, premala je elektromagnetaka sila koja bi suzila („pinch-efekt“) metalni most (B). Potom, zahvaljujući smanjenom električnom otporu u premošćivanju, struja raste progresivno zagrijavaajući žicu Jouleovim efektom (toplina koju proizvede električna struja prolaskom kroz vodič (elektrodu) tijekom nekoga vremena, jednaka umnošku električnoga otpora, kvadrata električne struje i vremena) (C), (D). Most je tako „odrezan“ kombiniranim efektom površinske napetosti i naposljetku progresivnih elektromagnetskih sila (pinch-efekt) koje se javljaju kao posljedica povećanja struje u posljednjoj fazi (E).

Time se kratki spoj prekida, dolazi do skoka napona, a struja počinje eksponencijalno padati prema svojoj nominalnoj vrijednosti. Porast struje mora biti dovoljno visok kako bi se ugrijala elektroda i da se obavi prijenos metala, ali ne smije biti previsok kako bi prskanje uzrokovano silovitim odvajanjem kapljice bilo što manje. Stopa rasta struje kontrolirana je podešavanjem induktiviteta u izvoru struje.

U točki (F) električni luk je ponovno uspostavljen. Po uspostavi kreće taljenje vrha elektrode koja se kontinuirano, jednolikom brzinom, kreće prema radnom komadu i tako se smanjuje razmak koji je ostao otkidanjem njenog vrha. Kada elektroda premosti razmak i dotakne radni komada proces se ponavlja prema (A). [3]



Slika 5.2. Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojevima [3]

Veliki utjecaj na prijenos materijala ima sastav zaštitnog plina koji drastično utječe na sile površinske napetosti rastaljenog metala. Utječe i na veličinu kapljice, trajanje kratkog spoja te operacijske karakteristike i dubinu penetracije.

Kod prijenosa metala kontaktom osim konvencionalnog čistog prijenosa kratkim spojevima, postoje još i prijenos premošćivanjem (*eng. Bridging transfer*) te prisiljeni prijenos kratkim spojevima (*eng. Forced short-circuiting transfer*). [5]

Prijenos premošćivanjem

Ovaj način događa se kad je žica podvrgnuta samo niskoj struji kod prijenosa kratkim spojevima za vrijeme kontakta kapljica-kupka. Sila površinske napetosti tako je pokretačka sila za prijenos metala, smanjujući važnost pinch efekta na odvajanje kapljice. Kod ovog načina nema prskanja ili odbacivanja kapljice zbog plitke kupke i oscilacije kapljica zbog čega mirno ponašanje kupke zavora dovodi do ujednačenosti šava. Najčešće je ovaj način izazvan s izvorom konstantne struje i/ili velikim induktivitetom jer ima ograničen raspon parametara (napon luka, struja zavarivanja i brzina zavarivanja). Kad je namješten ovaj način se može koristiti za spajanje tankih limova.[5]

Prisiljeni prijenos kratkim spojevima

Prijenos se odvija pri parametrima namještenim za kratki luk, ali s jako visokim brzinama dodavanja žice (iznad 10-12 m/min) za proizvodnju struje od 250 – 350 A. Kako je prijenos vođen velikim elektromagnetskim silama (pinch-efekt), kapljice su male veličine (nema vremena za postizanje većeg volumena) s visokom brzinom prijenosa čime se smanjuje efekt površinske napetosti. Visoka je razina prskanja. [5]

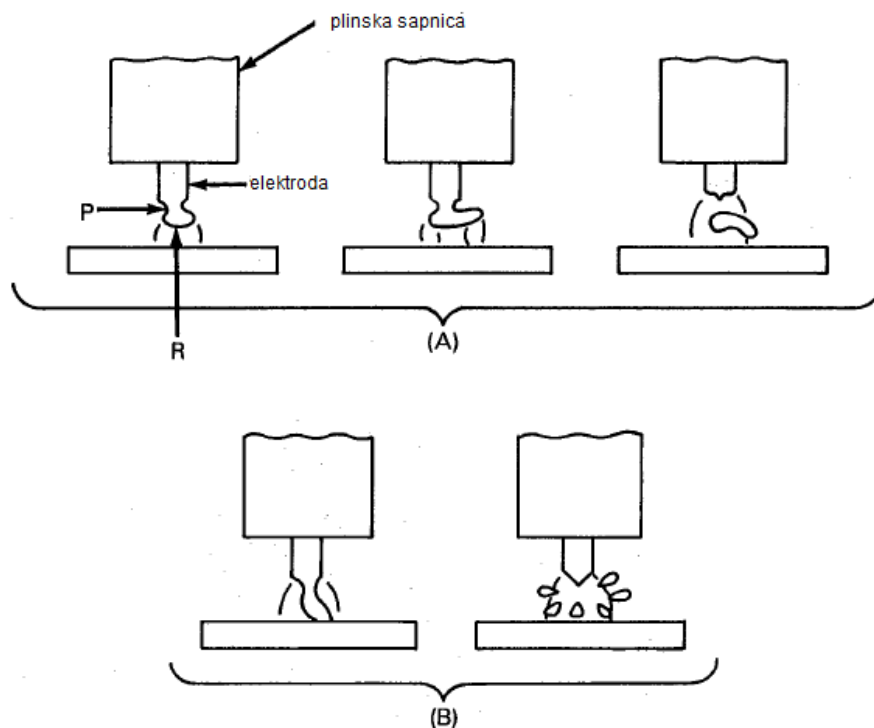
Prijenos materijala prijelaznim (mješovitim) lukom – G

Ovaj prijenos označuje se s G (*eng. Globular transfer*) Prijenos metala mješovitim lukom je kombinacija štrcajućeg i kratkog luka sa krupnijim kapljicama. Prijelaz se odvija pri relativno niskim strujama dok je elektroda priključena na pozitivan pol, ali uz veći napon kojem je cilj povećati dužinu luka kako bi se spriječilo stvaranje kratkog spoja (22-25V, 170-235A). Prijelazni luk karakterizira se veličinom kapljica čiji je promjer veći od onog elektrode (1.5 do 3 puta) i malom brzinom prijelaza kapljica, svega 1 do 10 kapljica u sekundi [5].

Kapljica se zadržava na vrhu elektrode za vrijeme svojeg rasta površinskom napetošću i reakcijom mlaza para. Kada veličina kapljice dostigne svoju kritičnu mjeru na nju najviše djeluje gravitacijska sila i aerodinamične sile radi čega je proces moguć samo u položenom položaju. Na strujama malo većim od onih za prijenos kratkim spojem, aksijalni prijenos mješovitim lukom postiže se u jako inertnoj zaštiti. Ako je dužina luka prekratka, zbog malog napona, kapljica koja raste može dotaknuti radni materijal pri čemu dolazi do pregrijavanja i raspada kapljice što proizvodi značajno prskanje. Dužina luka mora biti dovoljna kako bi se omogućilo odvajanje

kapljice prije nego što dodirne kupku zavara. S druge strane, veći napon luka po svojoj je prilici nepogodan zbog nedostatnog protaljivanja, nedovoljne penetracije, i pretjeranog nataljivanja metala. Zbog ovih nedostataka, koji prolaze iz niskih struja i visokih napona kako bi se izbjegli kratki spojevi, upotreba ovog načina prijenosa materijala u proizvodnji je ograničena. [3]

Upotreba CO₂ rezultira slučajno usmjerenim mješovitim prijelazom kod struja i napona značajnije iznad područja kratkih spojeva. Takav prijenos naziva se *Repelled globular transfer* ili odbojni mješoviti prijenos [5]. Kod upotrebe CO₂ zaštitnog plina struja se provodi kroz rastaljenu kapljicu, a zaštitni plin ne obuhvaća vrh elektrode. Anodna mrlja električnog luka tako je sužena i koncentrirana ispod kapljice što stvara odbojne sile (pinch-efekt djeluje unatrag, a problem stvaraju pare metala). Najvažnije sile su znači „pinch-efekt“ (P) i odbojna sila (R) prema slici 3. Velika kapljica formirana tik iznad kupke zavara rezultira velikim pritiskom na kapljicu uslijed skučenosti prostora. Sile tako odbijaju kapljicu od aksijalne osi žice uzrokujući daljnji rast i odmicanje u stranu. Uslijed gravitacijske sile dolazi do odvajanja kapljice prema radnom komadu. Proces je prikazan na slici 5.3. (A). Kidanje kapljice se može odviti i kratkim spojem (B) [3]



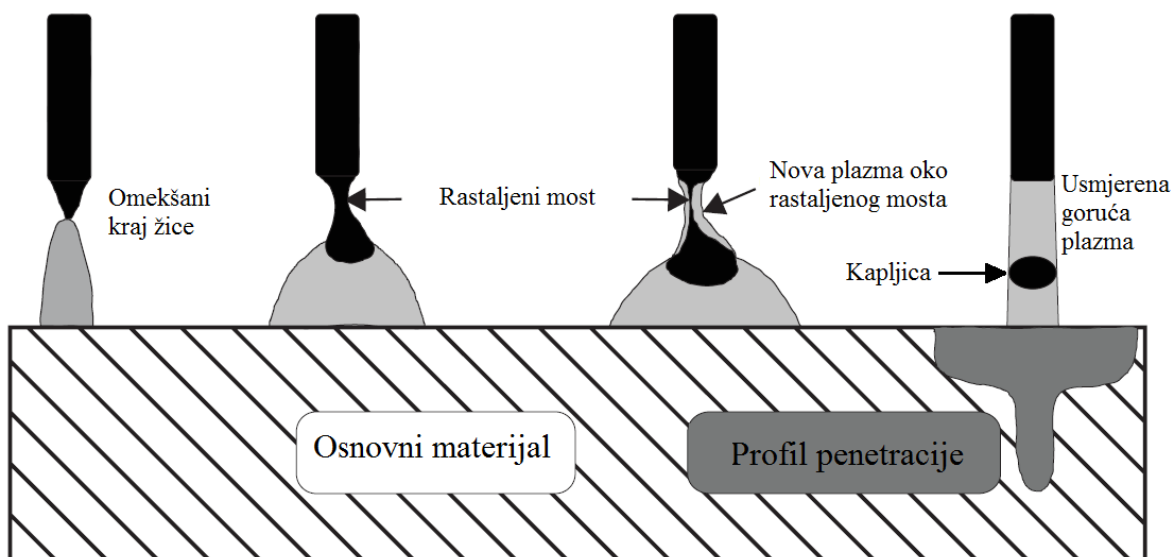
Slika 5.3. Dva slučaja odvajanja kapljice kod mješovitog prijelaza [3]

Ovaj prijenos materijala označuje se sa S (*eng. Spray transfer*). Moguće je postići veoma stabilan, aksijalni prijenos materijala bez prskanja, ali uz značajan udio inertnog plina, argona. Što je udio argona u mješavini veći potrebna je manja struja zavarivanja. Struje moraju biti dovoljno velike kako bi se prešla kritična granica i omogućio fini prijelaz bez prskanja, iznad vrijednosti tzv. prijelaznih struja. Na vrijednostima malo iznad kritične struje stvara se tzv. usmjereni štrcajući prijenos. Iznad te struje prijelaz se ostvaruju veoma sitnim kapljicama, a frekvencija je nekoliko stotina kapljica u sekundi koje se ubrzano aksijalno gibaju kroz međuprostor prema radnom komadu bez da i u jednom trenutku dođe do direktnog kontakta između elektrode i kupke zavara. Da bi se smanjile sile površinske napetosti kapljice dodaje se mala količina kisika (do 2%) čime se smanjuje vrijednost kritične struje.

Pošto je općenito pri prijenosu metala štrcajućim lukom veliki unos topline, u nekim slučajevima nije moguće primijeniti tako velik unos topline, kao npr. kod tankih limova gdje može doći do izgaranja materijala umjesto njegovog zavarivanja. Također, zbog velikog depozita može doći do stvaranja prevelike kupke zavara kod nadglavnog i vertikalnog zavarivanja. [3]

Visokoučinski štrcajući luk

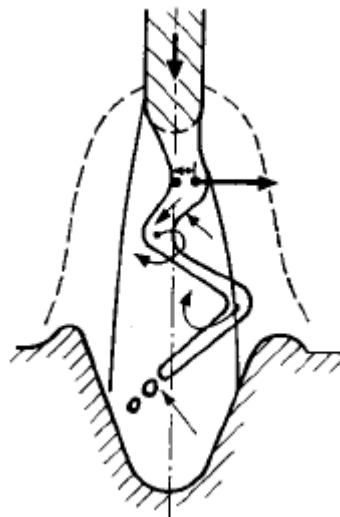
Povećanje struje prati povećanje slobodnog kraja žice čime se preko omskog otpora oslobađa toliko topline da je ona dostatna da sama tali žicu bez utjecaja električnog luka. S nadolazećom toplinom električnog luka kapljica, ovisno o površinskim napetostima, može narasti toliko da bude veća od promjera elektrode pa se stup plazme proširuje. Težina kapljice također izdužuje rastaljeni kraj žice elektrode čime se smanjuje dužina luka. Pritom se stvara rastaljeni most između kapljice i krutog kraja žice koji se sve više smanjuje pod utjecajem pinch efekta. Kada se most dovoljno suzi, nastaje nova plazma koja obuhvaća cijelu kapljicu. Nakon što se kapljica odvoji, električni luk ponovno dobiva svoj početni oblik i gori kao uski stup plazme zbog svojstvene kompresije uzrokovane okolnim magnetskim poljem. Suženi tok plazme ubrzava kapljicu na putu prema talini gurajući ju velikom silom. Rezultat prijenosa u obliku kapljica je uska i duboka penetracija prema slici 5.4. [8]



Slika 5.4. Prijenos metala kod visokoučinskog štrcajućeg luka [8]

Rotirajući luk

Iznad struja tekućeg štrcajućeg prijenosa, dolazi do stvaranja rotirajućeg luka povećanjem struje. Kod ovoga luka karakterističan je rotacijski prijenos rastaljenog kraja žice pri čemu se mora ispuniti preduvjet da je rastaljeni stup žice dovoljno velik. Ovaj prijenos se ostvaruje kod upotrebe zaštitnog plina argona uz dodatka kisika koji omogućuje dulji rastaljeni kraj žice. Takva mješavina smanjuje površinsku napetost taline te se na kraju elektrode prvo stvara rastaljeni metal u obliku gusjenice koja se zatim odvaja u mnoštvo sitnih kapljica. Zbog velikog slobodnog kraja žice i napona javlja se otpor prolasku struje zbog čega se razvija toliko toplina koja je dovoljna da sama rastali žicu bez utjecaja električnog luka. Jako elektromagnetsko polje, odnosno njena radijalna komponenta, upravlja rastaljenom gusjenicom te je pomiče iz simetrale i rotira prema slici 6. Zbog ove rotacije i amplitude električni luk se konusno proširuje, posebno kada ima dovoljnu dužinu. Prijenos materijala je radijalan u odnosu na osnovni materijal i u sitnim kapljicama ulazi u kupku zavora. Ovu pojavu je moguće vidjeti samo odgovarajućim tehničkim pomagalima jer je dužina svega nekoliko milimetara. Rotirajući luk ima visok stupanj stabilnosti i pritom zahtjeva duljinu slobodnog kraja žice od 25 do 35 mm [7].



Slika 5.5 Prijenos metala kod rotirajućeg luka [8]

5.1.2. Kontrolirani prijenos

Ovo područje sastoji se od "poboljšanog" prirodnog prijenosa kako bi se dobile bolje karakteristike procesa: manje prskanja, kontrola geometrije zavora, stabilizacija unosa topline itd [5]. Kako bi se dobila ova specifična svojstva koristi se napredna zavarivačka oprema koja automatski namješta i kontrolira prijenos. Rezultirajući prijenos kategoriziran je kao kontrolirani prijenos metala, ali se radi o djelovanju prirodnih načina dobivenih namjerno, bilo kroz promjene programskih parametara ili kroz adaptivnu kontrolu kao odgovor na variranje parametara.

Izvorni transformatorski ispravljači za zavarivanje kod MIG/MAG zavarivanja imali su fiksnu statičku karakteristiku i induktivnu kontrolu dinamičkog odziva. Ove značajke su ispunjavale osnove zahtjeve procesa i bile su izabrane kako bi se dobio stabilni rad pri kratkospojnim i štrcajućim prijenosima. No, postojao je prostor za napredak. Najraniji pokušaji kontroliranog prijenosa bili su prijenosi impulsnom strujom kod MIG/MAG zavarivanja koji su koristili impulse sinusoidne struje [6]

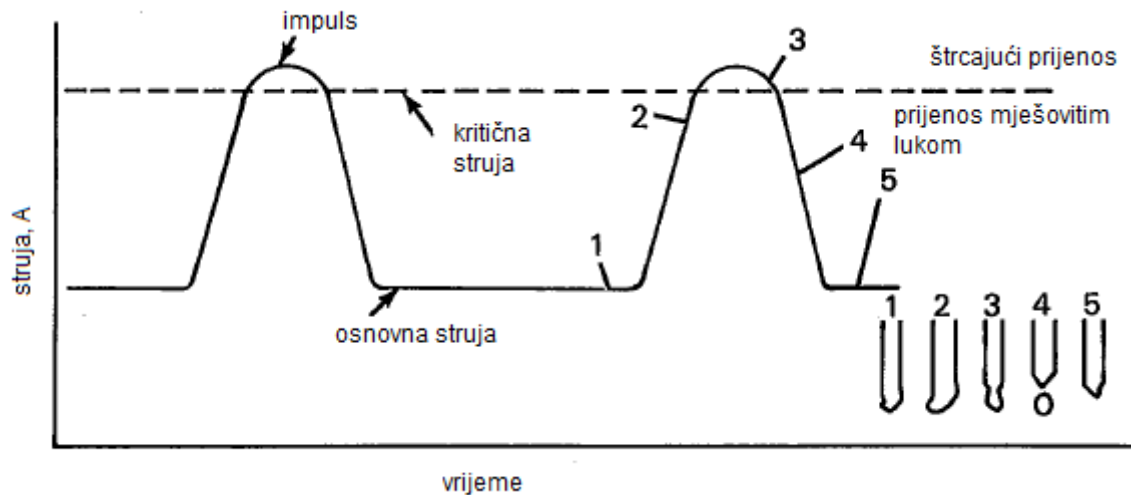
5.1.2.1. Prijenos metala impulsnim strujama – P

Ovaj prijenos materijala označuje se s P (*eng. Pulsed transfer*). Prema novoj klasifikaciji načina prijenosa metala prijenos metala impulsnim strujama spada pod područje kontroliranog prijenosa, a komercijalna upotreba počela je 60-ih godina. Ovim prijenosom moguće je ostvariti štrcajući tip prijenosa s vrijednostima struja ispod kritične struje. Ovakav prijenos metala ima

Fakultet strojarstva i brodogradnje _____ Domagoj Delač

mnogobrojne prednosti nad klasičnim MAG zavarivanjem: povoljniji prijenos metala, smanjeno štrcanje, manje deformacije, svi položaji zavarivanja, mogućnost automatizacije itd. Struja ima dvije razine, što je vidljivo na slici 5.6.

1. osnovna struja, koja održava luk, ali ga ne opskrbljuje s dovoljno energije da se formira kapljica na vrhu elektrode
2. struja impulsa, čiji je vrh amplitude veći od kritične struje koja je potrebna za štrcajući luk



Slika 5.6. Karakteristika impulsne struje [3]

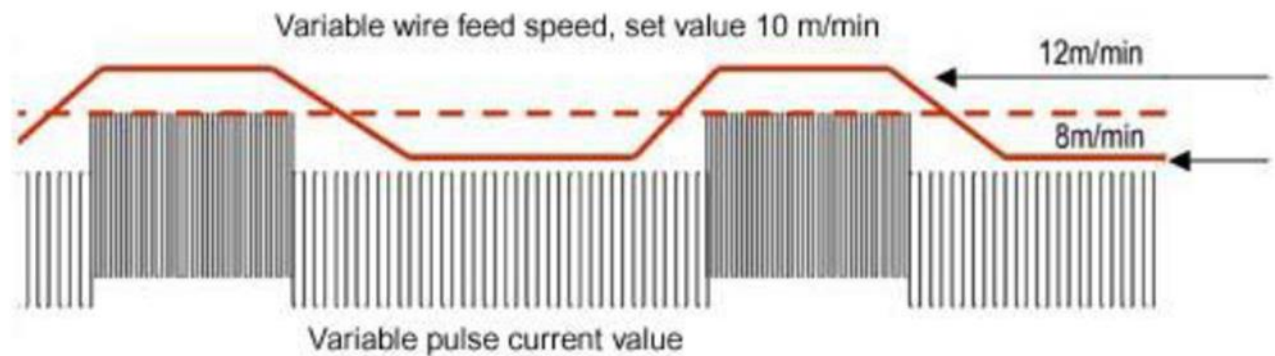
Za vrijeme svakog impulsa odvaja se kapljica, a vrijeme trajanja impulsa mora biti precizno određeno. Frekvencija i amplituda impulsa određuju energiju luka i na taj način brzinu taljenja žice. Uobičajeno se frekvencija impulsa pri MIG/MAG zavarivanju kreće od 50 do 250 Hz [9]. Pri dobro oblikovanim i odabranim parametrima pulsa ne dolazi do kratkih spojeva te je visina električnog luka konstantna. Smanjenjem prosječne energije luka i brzine taljenja žice moguća su zavarivanja u svim pozicijama i onih debljina koja su nedostupna kod štrcajućeg luka.

Međutim, ovi sustavi bili su najčešće fiksne frekvencije (višekratnik frekvencijske mreže) te je i podešavanje bilo teško i nije bilo podložno ugađanju parametara. Jedna od varijacija kontroliranog impulsnog zavarivanja je zavarivanje duplim pulsom ili korištenjem izmjenične struje.

Zavarivanje duplim pulsom

Moderni uređaji imaju mogućnost programiranja i odabira odgovarajućih tzv. sinergijskih krivulja za određenu kombinaciju materijala, zaštitnog plina, debljine materijala i promjera žice. Korisnik odabire željenu količinu depozita (brzine žice) i unosa topline sa samo jednim potencijetrom tzv. „one knob“ control pri čemu postoji mogućnost fine regulacije visine

električnog luka. Pri zavarivanju duplim pulsom dolazi do pulsiranja tj. promjene intenziteta struje zavarivanja i brzine žice, slika 5.7. Dodatno dolazi i do promjene frekvencije struje na višem i nižem nivou. Drugim riječima, za impulsnu struju postoje dva nivoa tj dva seta osnovne i vršne struje kao i dvije frekvencije za svaki od tih setova impulsa. Izmjena nižeg i višeg seta impulsa također ima definiranu frekvenciju i to najčešće reda veličine nekoliko Hz. Paralelno sa strujom raste i napon zavarivanja, što dovodi do povećanog unosa topline pri višem setu impulsa. Shodno tome, dupli puls daje više energije od običnog impulsnog zavarivanja te dolazi do povećanja količine nataljenog materijala. Za vrijeme višeg nivoa pulsa tali se više žice i osnovnog materijala, dok se pri nižem nivou unosi manje energije i sprječava se pregaranje osnovnog materijala. Kako se mijenja unos energije pri višem i nižem puls tako se pri zavarivanju duplim pulsom mijenja brzina dodavanja žice, od minimalne do maksimalne vrijednosti. Vizualni efekt daje vrlo veliku sličnost geometrije zavora s TIG zavarivanjem. [9]

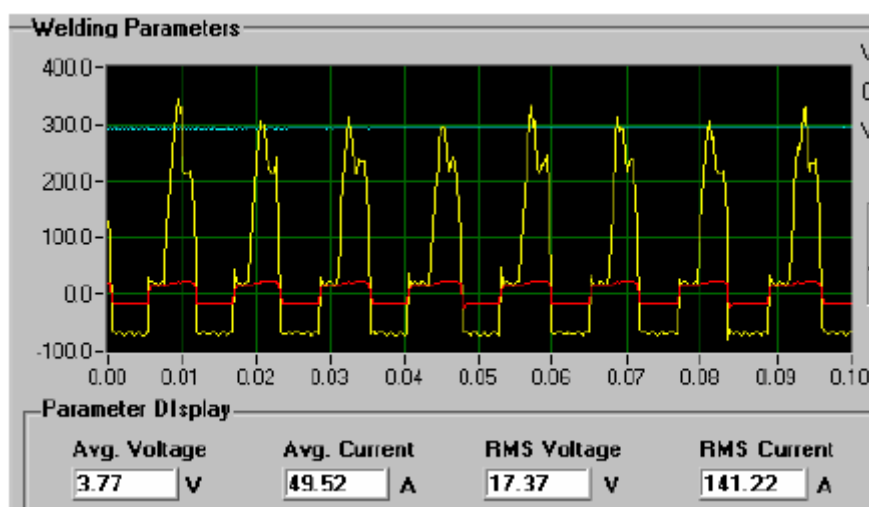


Slika 5.7. Zavarivanje duplim impulsom [9]

AC MIG

Kod MIG/MAG postupka se pretežito primjenjuje pozitivan polaritet na žici i to kod konvencionalnih i modernih postupaka. Negativan polaritet daje veću brzinu taljenja i veći depozit uz manju penetraciju, ali je ponašanje električnog luka na negativnoj elektrodi nepravilno i ima dosta prskanja kod MAG zavarivanja. Struja je kod ovog načina automatski namještena od stroja koji koristi algoritam da bi formirao prikladan period pulsa i osnove struje. Za vrijeme negativnog polariteta, formiraju se kapljice na kraju žice. Kada struja prelazi na pozitivan polaritet odvaja se kapljica prema kupci zavora. Primjena negativnog polariteta je česta kod praškom punjenih žica. Primjena promjenjivog polariteta na žici kod MAG zavarivanja tj. izmjena pozitivnog i negativnog ciklusa na žici omogućuje bolju kontrolu procesa i premošćivanje većih zazora kod tanjih materijala. Izmjenom polariteta postiže se precizna kontrola distribucije topline u električnom luku tj. balansom pozitivnog i negativnog pola na

Fakultet strojarstva i brodogradnje _____ Domagoj Delač
elektrodi i radnom komadu. Međutim, treba napomenuti da su izvori struje za AC MIG su dosta složeni i kompleksni. Tipična dinamička karakteristika prikazan je na slici 5.8. [9]



Slika 5.8. Dinamička karakteristika AC MIG [9]

5.1.2.2. Kontrolirani prijenos kratkim spojevima

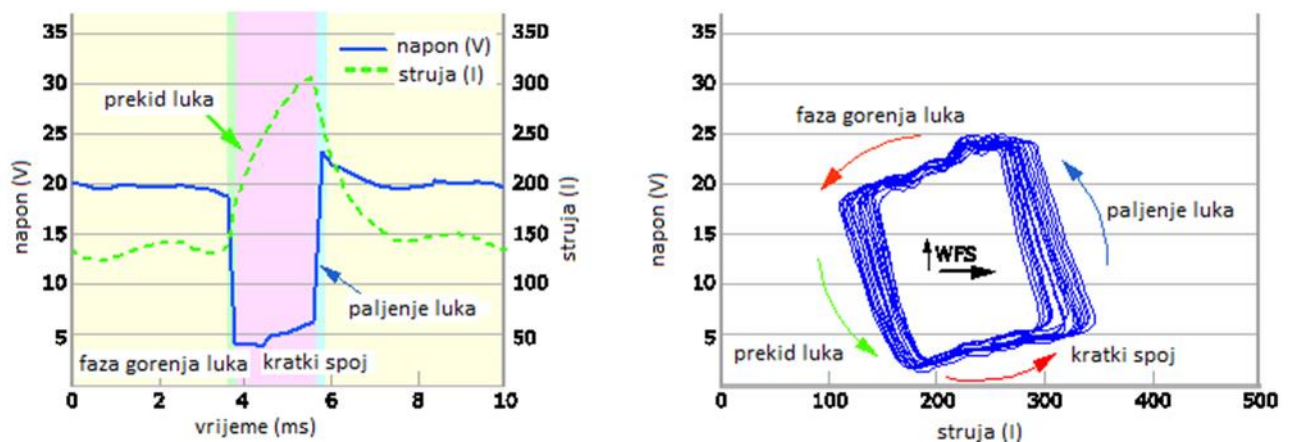
Najveći nedostatak kod konvencionalnog prijenosa kratkim spojevima je prskanje koje je povezano stiskanjem rastaljenog metala elektromagnetskim silama (pinch efekt) za vrijeme rasta struje kod odvajanja kapljice. Kao odgovor na to u posljednje vrijeme došlo je do napretka u kontroli kako bi se stabilizirala struja i unos topline.

Na ovaj način prijenosa može se gledati kao na sredstvo poboljšanja pravilnosti kontakta kapljica koja se događa kod prirodnog transfera kratkim spojevima. Smanjenjem slučajnosti prirodnog prijenosa, postignuto je „mekše“ odvajanje kapljice. Zbog visoke toplinske pravilnosti nema prskanja i poboljšana je kontrola kupke zavara. Da bi se to ostvarilo koristi se kontrolni sistem za modulaciju struje (kontrola napona kroz svaki dodir) ili se još dodaju varijacije dodavanja žice koje lome metalni rastaljeni most. Mnogi komercijalni postupci koriste ovakav kontrolirani način prijenosa: STT – Surface Tension Transfer, FastROOT, CMT – Cold Metal Transfer, CSC – Controlled Short Circuit, Cold Arc, RMD – Regulated Metal Deposition itd.

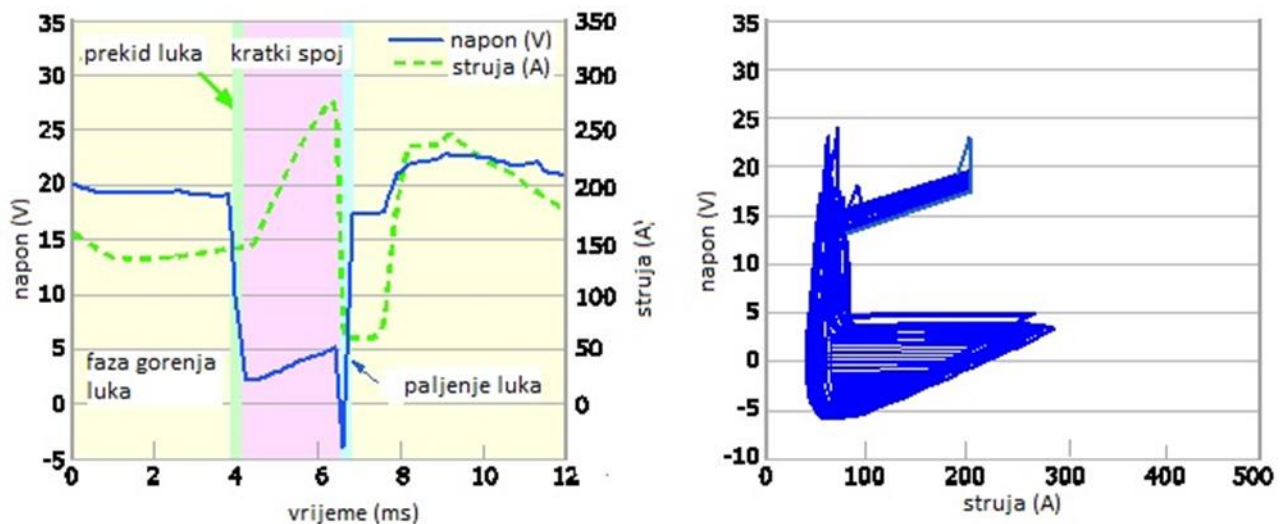
Razvoj i primjenu ovog načina prijenosa omogućio je napredak u izvorima napajanja s tehnologijom elektroničke kontrole čime se poboljšala stabilnost profila struje i unosa topline. Novi izvori napajanja omogućuju kontrolirani prijenos kratkim spojevima prateći napon i podešavajući valove struje zavarivanja. To reducira štrcanje rastaljenog materijala i unesenu toplinu u osnovni materijal. U suštini značajno smanjenje struje je odmah prije ponovnog paljenje luka kako bi se kontroliralo prskanje. Međutim, kako te tehnike smanjuju struju u žici

prema kraju faze kratkog spoja, zagrijavanje žice se smanjuje što ima za posljedicu hladniju kupku zavara i manje rastaljenog materijala.

Za razliku od konvencionalnog, slika 5.9., koji se sastoji od uzastopnog ponavljanja ciklusa sa sljedećim fazama: gorenja luka, kontakta žice s osnovnim materijalom/prekida luka, kratkog spoja, porasta struje, odvajanja kapljice/paljenja luk, elektronički upravljani prijenos kratkim spojevima ima smanjenu struju upravo prije prekida kratkog spoja što je prikazano iscrtkanom crtom na slici 5.10. Tako se smanjuje onečišćivanje štrcanjem rastaljenog materijala. U današnje vrijeme razvijeno je mnogo izvora napajanja koji rade na sličan način, a koji je prikazan dijagramom na slici 5.10. [10]



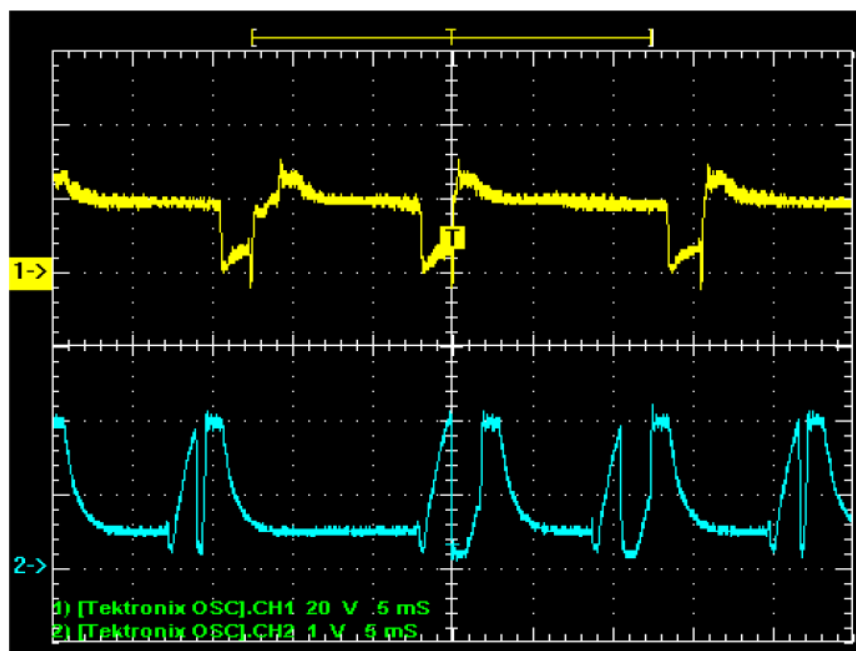
Slika 5.9. Tipičan dijagram napon/struja i ciklogram za kratke spojeve [10]



Slika 5.10. Tipični dijagram napon/struja i ciklogram za kontrolirani prijenos kratkim spojevima [10]

STT (Surface Tension Transfer) [Lincoln electric]

STT postupak za finu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice koristi mehanizam površinske napetosti. Porast struje u kratkom spoju se zaustavlja kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog metala samo uz djelovanje površinske napetosti. Upravo ta kontrola sprječava porast struje koji uzrokuje rasprskavanje kapljice rastaljenog metala te istovremeno maksimalizira utjecaj površinske napetosti. Međutim, nakon tog odvajanja slijedi strujni impuls koji priprema i zagrijava vrh žice za novi ciklus odvajanja kapljice. Završna struja tog impulsa, tj. Njen nagib bitno utječe na unos topline te se kao parametar posebno regulira. Rezultat je vrlo nizak unos energije uz eliminaciju štrcanja. Dinamička karakteristika uz $1-u=f(t)$; $2-i=f(t)$ prikazana je na slici 5.11.



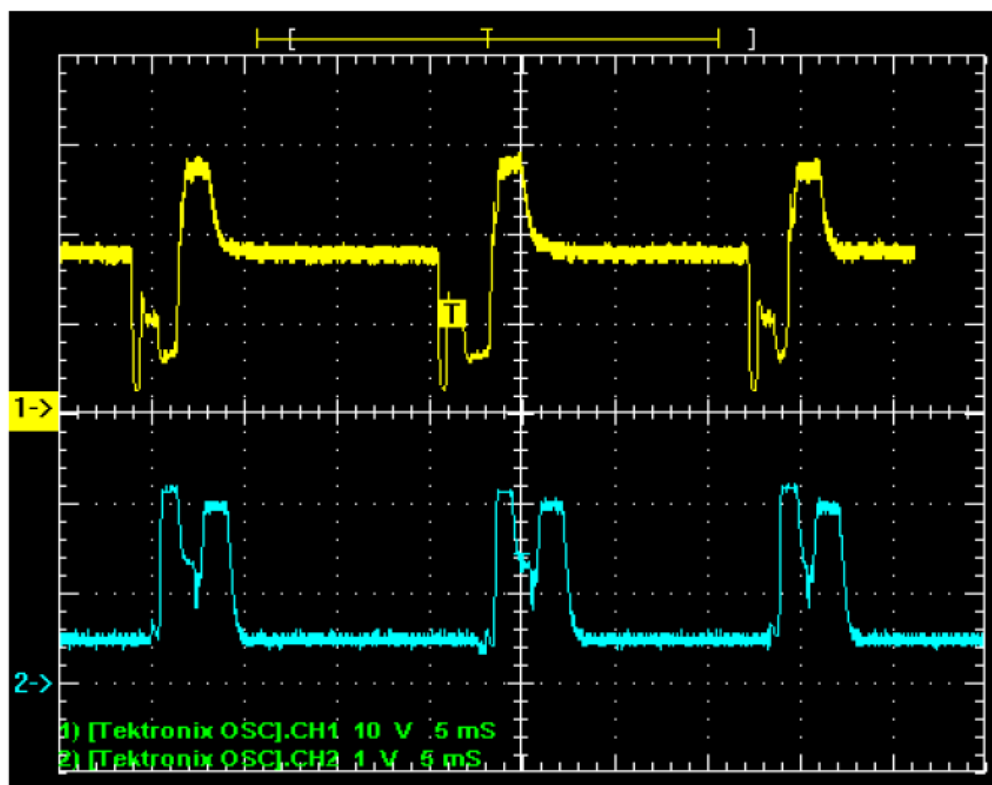
Slika 5.11. Dinamička karakteristika STT postupka [9]

Zbog pogodnosti za provarivanje korijenskog zavora i primjene kod zavarivanja tanjih limova uz kvalitetu zavarenih spojeva koja se može uspoređivati sa kvalitetom zavarenih spojeva izvedenih TIG postupkom zavarivanja, STT postupak naišao je i nailazi na sve veću primjenu u praksi [?].

FastROOT [Kemppi]

Osnovni koncept FastROOT postupka zasniva se na modificiranom prijenosu metala kratkim spojevima što rezultira niskim unosom energije. Pri zavarivanju ovim postupkom napon i struja

zavarivanja su digitalno kontrolirani. Obrazac kombinacije struje kratkog spoja i sekundarnog strujnog pulsa za zagrijavanje javlja se i ovom slučaju. Naime, nakon prvog stanja kratkog spoja u kojem dolazi do odvajanja kapljice aktivira se drugi strujni interval koji zagrijava osnovni materijal i vrh žice te ga priprema za novi ciklus. Ovim sekundarnim strujnim pulsom dovodi se značajna količina topline koja utječe na oblikovanje zavarenog spoja. Nakon toga održava se osnovna struja koja osigurava energijsko stabilno stanje električnog luka i taline do slijedećeg kratkog spoja. Da bi se realizirao ovako sofisticirani prijenos metala u električnom luku potrebna je izrazito brza regulacija jačine struje i napona u svakom trenutku odvajanja kapljice što rezultira prijenosom metala bez štrcanja [9]. Dinamička karakteristika FastROOT uz $1-u=f(t)$; $2-i=f(t)$ prikazana je na slici

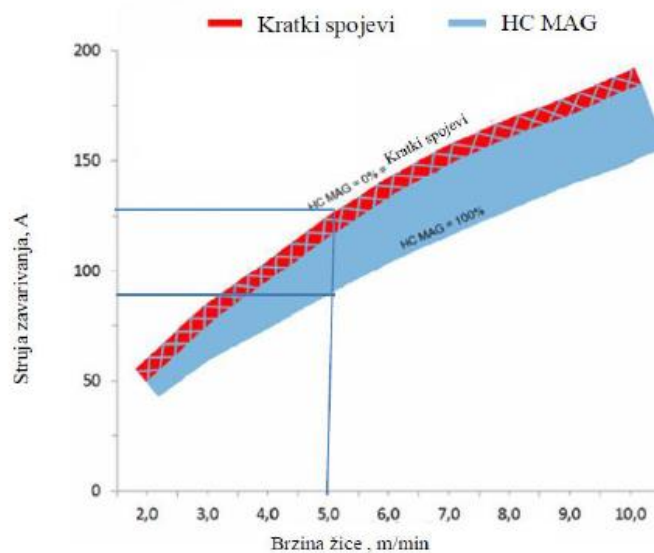


Slika 5.12. Dinamička karakteristika FastROOT postupka [9]

HC MAG

HC-Heat Controlled MAG modificiran je postupak zavarivanja kratkim spojevima u rasponu do 200A pri čemu se distribucijom pozitivnog i negativnog polariteta na žici može precizno upravljati količinom rastaljenog metala i penetracijom upravo zbog načela fizikalnih procesa pri zavarivanju izmjeničnom strujom. Kada je udio negativnog polariteta minimalan (ili ga uopće nema), prijenos metala u električnom luku se odvija standardnim kratkim spojevima (gornje područje), slika 6. Povećanjem udjela negativnog polariteta za istu brzinu žice smanjuje se struja

Fakultet strojarstva i brodogradnje _____ Domagoj Delač
zavarivanja što znači da uz bitno niži unos topline postizemo jednaki učinak taljenja, slika 6. Nadalje, znatno se proširuje i radno područje parametara zavarivanja ili navarivanja za određenu brzinu žice što daje i veću fleksibilnost pri određivanju radnih područja. [9]



Slika 5.13. Ovisnost jakosti struje o brzini žice za prijenos metala kratkim spojevima i HC MAG
Postupkom [9]

Prijenos kratkim spojevima kontroliran strujom i dodavanjem žice

CMT (Cold Metal Transfer) [Fronius]

CMT postupak predstavlja modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima pri čemu se primjenjuje „mehaničko“ rješenje tj. Povratno gibanje žice. Karakteristično je da se odvajanje kapljice odvija u uvjetima jako niskog unosa topline koji kod klasičnog prijenosa kratkim spojevima jednostavno ne bi bio dovoljan. U ovom slučaju povratno gibanje žice kompenzira nedostatak toplinske energije i elektromagnetske sile jer se prijenos metala odvija pri vrlo niskoj jačini struje. Digitalna tehnologija omogućuje precizno upravljanje gibanjem žice, a specifična je i vrlo precizna regulacija duljine električnog luka pomoću mehaničkog gibanja. Frekvencija povratnog gibanja žice je najčešće između 60 i 80 Hz što zahtjeva vrlo sofisticiranu kontrolu gibanja žice i primjenu određenih rješenja poput ugradnje dodatnog servomotora u pištolj za zavarivanje i ugradnju međuspremnik žice tzv. „wire buffer“ koji kompenzira povrat žice elastičnom deformacijom. Na slici 5.14. shematski je prikaz povratnog gibanja žice.



Slika 5.14. Princip rada CMT postupka [9]

Prijenos kratkim spojevima kontroliran dodavanjem žice

CSC [Jetline engineering]

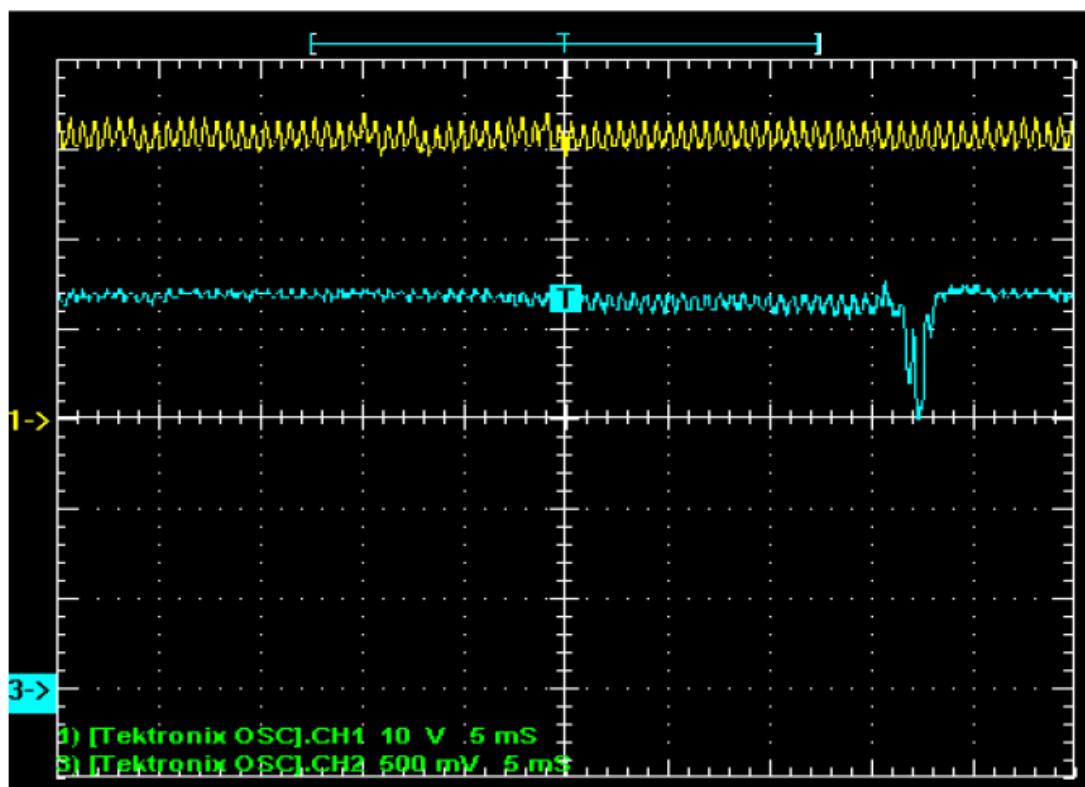
Ovaj način koordinira proces brzinom i smjerom dodavanja žice s razinom struje koja se daje iz izvora struje. Proces ima dvije primarne faze: fazu luka i kratkih spojeva. Kontrolni sustav motri napon između elektrode i radnog komada kako bi odredio u kojoj se fazi proces nalazi u svakom trenutku. Ako je napon iznad maksimalnog postavljenog napona, proces se nalazi u fazi luka. Ako je napon ispod minimalno postavljenog napona proces je u fazi kratkog spoja.

Kontrolni sustav namješta razinu struje koja ide u proces ovisno o fazi u kojoj se sustav nalazi. Svaka faza je podijeljena u tri dijela: početak, impuls i kraj. Ova tri segmenta struje se uzimaju kako bi se kontrolirao oblik i veličina šava. Za vrijeme faze luka generira se toplina koja rastaljuje osnovni i dodatni materijal te se kapljica otkida kontaktom s osnovnim metalom. Za vrijeme kratkog spoja napon pada ispod praga što je signal sustavu da povuče žicu i prekine spoj. Kontrolni sustav dobiva signal da je kratki spoj prekinut kad napon poraste iznad maksimalnog praga te povlači žicu prema unaprijed podešenoj dužini luka. Jednom kada je luk uspostavljen kontrolni sustav dovodi žicu iznad kupke zavara čime se proces ponavlja [11].

5.1.2.3. Kontrolirani prijenos štrcajućim lukom

RMT (Rapid MIG/MAG Technology) [ESS Schweisstechnik]

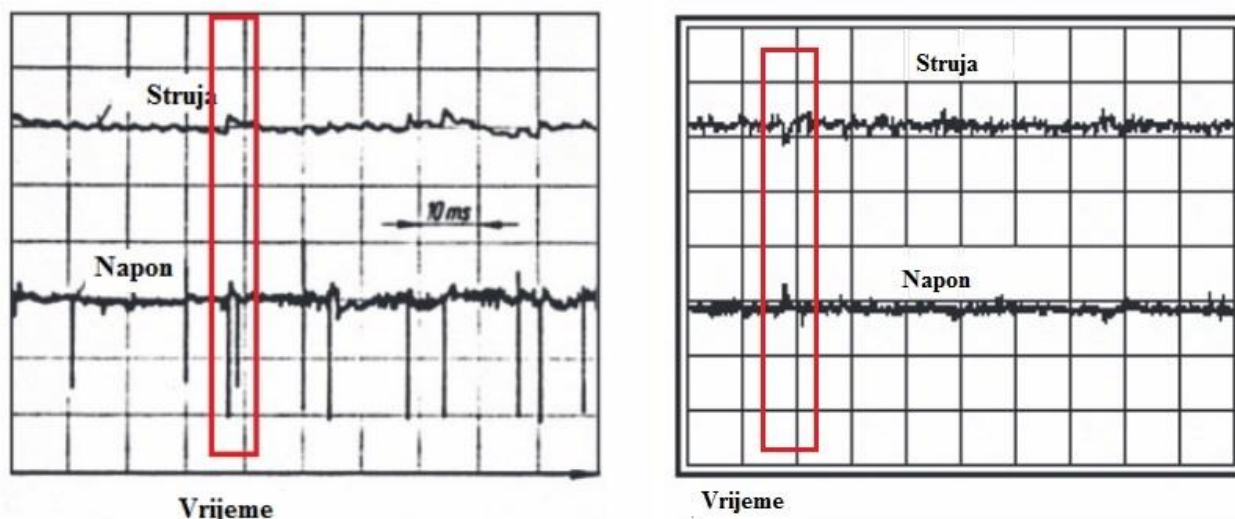
RMT je postupak koji se temelji na štrcajućem luku. Za razliku od klasičnog štrcajućeg luka, koji ovisi o karakteristikama dodatnog materijala i o zaštitnom plinu, kod RMT MAG postupka prijenos materijala zbiva se u jako sitnim kapljicama pri čemu je frekvencija prijenosa oko 2-3 kHz. Tim mehanizmom se još sužava jezgra luka, snizuje napon i visina luka u odnosu na klasični štrcajući luk što rezultira većom koncentracijom energije i znatno intenzivnijom penetracijom. U odnosu na štrcajući luk postižu se veće brzine zavarivanja tako da je u konačnici unos topline niži. Na slici 5.15 je prikazana je dinamička karakteristika uz $1-u=f(t)$; $2-i=f(t)$



Slika 5.15. Dinamička karakteristika RMT procesa [9]

ForceArc [EWM]

ForceArc je modificirani način prijenosa štrcajućim lukom, pri relativno nižoj duljini u odnosu na konvencionalni štrcajući luk, s mehanizmom izbjegavanja rastaljenog materijala. Ovaj postupak je razvijen zahvaljujući inverterskoj tehnologiji i digitalnom upravljanju pomoću koje je omogućena brza korekcija parametara u slučaju kratkog spoja. Struja zavarivanja se smanjuje vrlo brzo nakon ponovne uspostave električnog luka, dok napon ne postigne nominalnu vrijednost. To znatno smanjuje vrijeme kratkog spoja i reducira štrcanje kapljica na minimum. Slika 5.16. prikazuje oscilogram struje i napona kod konvencionalnog štrcajućeg i forceArc prijenosa matala u električnom luku, na kojima se jasno vidi da se čak i pri pojavljivanju kratkih spojeva ne javljaju velike promjene struje i napona koje bi uzrokovale špricanje. [12]



Slika 5.16. Usporedba dinamičke karakteristike kratkog spoja i forceARC-a [12]

5.2. Kratki pregled modificiranih inačica kod MIG/MAG zavarivanja

Modificirani postupci se danas koriste uz minimalne izmjene u konceptu MAG zavarivanja s naglaskom na:

1. Izuzetnu kontrolu prijenosa materijala u električnom luku
2. „niskoenergijske” postupke
3. povećanu penetraciju
4. „prepoznavanje” dužeg slobodnog kraja žice [9]

Ono što omogućuju novi koncepti MIG/MAG zavarivanja je svojevrsna interakcija različitih opcija prijenosa materijala u području parametara i energijskog nivoa gotovo neprimjenjivog kod konvencionalnih postupaka i izvora struje za zavarivanje. Suvremeni postupci MAG zavarivanja se odlikuju modificiranim načinima prijenosa metala kojih je uvijek osnova kratki spoj, štrcajući luk i impulsna struja. To se postiže kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje i napona zavarivanja (tzv. *waveform control*), indirektnom kontrolom drugih sila koje sudjeluju u prijenosu metala (površinska napetost), kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u istom radnom ciklusu, promjenom balansa polariteta i uvođenjem izmjenične struje te uvođenjem mehaničkog upravljanja odvajanja kapljice koja kompenzira vrlo mali unos topline koji je u konvencionalnom sustavu nedostatan za odvajanje dodatnog materijala. Danas se zahvaljujući razvoju uređaja moguće integracije dvije impulsne razine u istom procesu. Važno je naglasiti da

se kontrola procesa provodi u svakom trenutku diskretizacijom vrijednosti tj. primjenom digitalne tehnologije. [9]

Suvremeni postupci MAG zavarivanja primjenjuju sve nabrojene mehanizme kako bi se olakšalo zavarivanje tankih materijala, smanjio unos topline i deformacije, omogućilo lakše zavarivanje korijenskog prolaza, raznorodnih materijala te povećanih razmaka između limova. Međutim, osim ovih prednosti koje u biti predstavljaju zavarivanje u području razine parametar kratkih spojeva razvijeni su i sustavi modificiranog štrcajućeg luk koji se odlikuju znatno poboljšanom penetracijom. [6]

Daljnja povećanja produktivnosti mogla bi biti postignuta upotrebom tandem MIG/MAG zavarivanja i hibridnog postupka laser – MAG (52+ 135)

Tablica 5.2. Rang modifikacija i njihova ograničenja [4]

Modifikacija	Prednosti	Ograničenje	Primjer
Prošireni slobodni kraj žice - visoke struje - štrcajući prijenos	Velike stope depozita, 15 kg/h	Visoke struje, samo za automatiziranu primjenu, čelične ili otporne žice	T.I.M.E, Rapidmelt, MigFAST
Prošireni slobodni kraj žice - niske struje – prijenos kratkim spojevima	Niski energetska unos pri malim strujama za tanke materijale		MigFAST, RapidARC
Elektronegativni polaritet istosmjernje struje (DC)	Visoke stope depozita, niski energetska unos u materijal	Plinovi na bazi argona	Upotreba kod metalnim praškom punjenih žica
Štrcajući prijenos s kratkim spojevima	Malo para, duboka penetracija	Zahtjeva određene dinamičke karakteristike	ForceARC
Štrcajući sprej s kontrolom impulsa	Jedna kapljica po impulsu, malo prskanja, laka kontrola	Dugački luk, teška kontrola korijenskog zavora	RMT
Prijenos metala impulsnim strujama	Glatki prijelaz	Manje robustna kontrola	
Prijenos metala	Bolja kontrola	Visoka cijena uređaja	AC MIG

impulsnim strujama s izmjeničnom strujom	procesa, premošćivanje većih zazora kod tankih materijala		
Prijenos kratkim spojevima kontroliran strujom	Manje prskanja, niski unos topline, dobre karakteristike kod povlačenja korijenskog prolaza		STT, RMD, Fastroot, Cold Arc, Cold Process, Optarc
Prijenos kratkim spojevima kontroliran dodavanjem žice	Prijenos kratkim spojevima s većim promjerom	Kompleksni sustav za dodavanje žice	CSC
Prijenos kratkim spojevima kontroliran strujom i dodavanjem žice	Niski unos topline, visoke brzine na tankim materijalima, za legure na bazi željeza i aluminija	Najčešća automatska primjena	CMT
Dvostruki impuls	Poboljšana kontrola, izgled šava sličan kao kod TIG-a		Synchro-pulse
Tandem MIG/MAG zavarivanje	Visoke brzine zavarivanja, male distorzije	Interakcija luka	
Hibrid LASER + MAG	Visoke brzine zavarivanja, viša tolerancija na razmak nego kod lasera	Automatska upotreba, sigurnosni zahtjevi i visoki troškovi zbog lasera	

6. RAZVOJ TIG ZAVARIVANJA

TIG zavarivanje je elektrolučni postupak koji koristi luk između netaljive volframove elektrode i radnog komada kako bi se uspostavila kupka zavara. Proces se koristi sa zaštitnim plinom, koristeći samo toplinsku energiju izvora s ili bez upotrebe dodatnog materijala. Proces je razvijen u kasnim 30-ima za zavarivanje nemagnetskih materijala, prvenstveno magnezija i aluminija i za metale koji se teško zavaruju. Zbog visoke kvalitete zavara koja se može postići TIG zavarivanje je postalo neophodnim postupkom za mnoge proizvođače, uključujući one u zračnoj, nuklearnoj, vojnoj, petrokemijskoj, poluvodičkoj industriji itd.

Ovaj proces doživljava stalne napretke tako da su razvijeni uređaji samo za ovaj postupak koji imaju mogućnost kontrole impulsa struje. Razvijeni su sustavi hlađenja na bazi vode i zraka za gorionike. Legirni aktivni elementi koji se dodaju elektrodi povećavaju emisivnost što utječe povoljno na uspostavljanje luka, stabilnost luka i vijek elektrode. Također, razvoj ide i u uklanjanju radioaktivnih legirnih elemenata, kao torija, koji utječu negativno na zdravlje zavarivača te zamjenom s povoljnijima. Razvoj plinova za zavarivanje poboljšava performanse zavarivanja. Koriste se aktivatori i praškom punjene žice kao dodatni materijali koji utječu na veću penetraciju i olakšavaju zavarivanje. Daljnji napredak ovih postupaka ide u pravcu automatske kontrole, opreme, parametara, kvalitete zavara, sigurnosnih zahtjeva itd. [3]

Prema ISO 4063 : 2009. značajno su proširene opcije kod TIG zavarivanja:

141 TIG zavarivanje punom žicom ili šipkom

142 TIG zavarivanje bez dodatnog materijala

143 TIG zavarivanje s praškom punjenom žicom ili šipkom

145 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i pune žice ili šipke

146 TIG zavarivanje primjenom reducirajućeg plina i praškom punjene žice ili šipke

147 Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom primjenom aktivnog plina (TAG zavarivanje)

Uz uvođenje novih oznaka u ovu grupu zavarivačkih postupaka po prvi puta se može naznačiti opcija hladna/vruća žica ako se koristi dodatni materijal. Hladna žica ima oznaku C, a vruća žica ima oznaku H. [1]

Prema [9] trendovi u razvoju kod TIG zavarivanja su sljedeći:

- Uspostava el. luka i razvoj elektroda (lantanov oksid)-zamjena za torij
- Dodatni materijali-praškom punjene žice-nema zaštite korijena
- A-TIG-primjena aktivatora
- K-TIG -visoko penetracijski postupak- „keyhole”
- Automatsko dodavanje materijala-vruća i hladna žica
- Impulsna struja kvadratnog oblika
- Visoke frekvencije impulsnog zavarivanja
- „dual-gas” sustav

6.1.Razvoj elektroda

Elektroda kod TIG zavarivanja služi isključivo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Elektroda je netaljiva i ako se ispravno koristi ona se ne tali i ne prenosi u zavar. Temperatura tališta volframa je 3410°C. Dosezanjem te temperature volfram postaje izvor elektrona zbog termoelektronske emisije. Ta temperatura postiže se zagrijavanjem elektrode zbog električnog otpora, pri kojem ne dolazi do taljenja zbog emisije elektrona na vrhu elektrode koja uzrokuje značajno hlađenje. Tako je vrh elektrode hladniji od dijela elektrode iznad vrha do vanjsko hlađene kontaktne cjevčice [3].

Elektrode se izrađuju na bazi volframa s malim dodatcima (1...2%) dok se danas jako rijetko koriste elektrode od čistog volframa. Elektrode legirane lantanovim oksidom (La_2O_3) razvile su se prvenstveno kao zamjena za torij koji je radioaktivan. Uz njih su još razvijene volframove elektrode legirane s cerijem ili cirkonijem.

U komercijalnoj upotrebi danas su tri vrste volframovih elektroda legiranih lantanovim oksidom u omjerima od 1, 1,5 i 2 posto sljedećih oznaka prema AWS: EWLa-1, EWLa-1,5 i EWLa-2. [13]

EWLa-1 ima slična svojstva kao volframove elektrode legirane cerijem.

EWLa-1,5 sadrže minimalno 97,80% volframa i 1,3 do 1,7 % lantana. Elektrode legirane lantanom imaju odličan utjecaj na paljenje luka, nisku stopu izgaranja, dobar utjecaj na stabilnost luka i odlične karakteristike na ponovno paljenje luka. Ove elektrode imaju provodna svojstva slična onim legiranim s 2% torija, što znači da ih mogu zamijeniti bez značajnijeg utjecaja na

zavarivački proces. Elektrode s lantanom rade dobro s izmjeničnim i istosmjernim strujama na negativnom polu s zašiljenim vrhom. One mogu biti i zaobljene za upotrebu s izmjeničnim sinusoidalnim strujama. Lantan se dispergira jednolično kroz cijelu dužinu elektrode tijekom proizvodnje. Ove elektrode također održavaju izoštren vrh što je jako važno za zavarivanje čelika i nehrđajućih čelika na AC ili DC izvorima s impulsnom strujom kvadratnog oblika.

Za razliku od elektroda s torijem ove elektrode su primjerene za upotrebu s izmjeničnim strujama, dopuštajući zapaljivanje i održavanje luka pri nižim naponima. U usporedbi s čistim volframovim elektrodama, dodatkom 1,5 % posto lantanovog oksida rang struja za zavarivanje je do 50 posto veći za istu veličinu elektrode.

EWL_a-2 sadrže najviše pojedinačnog dodatnog elementa uopće, sličnih su karakteristika kao 1,5% s još boljim utjecajem na paljenje luka, njegovu stabilnost i manje erozije vrha. [14]

U tablici 6.1 navedene su oznake boja za određene volframove elektrode legirane lantanovim oksidom i te postotni raspon udjela legirnog elementa za pojedine oznake.

Tablica 6.1. Podjela volframovih elektroda legiranih lantanom prema AWS. [13]

AWS klasifikacija	Boja	Legirni element	Legirni oksid	Postotni udio
EWL _a -1	Crna	Lantan	Al ₂ O ₃	0.8 - 1.2%
EWL _a -1.5	Zlatna	Lantan	Al ₂ O ₃	1.3 - 1.7%
EWL _a -2	Plava	Lantan	Al ₂ O ₃	1.8 - 2.2%

6.2. Razvoj dodatnih materijala – praškom punjene žice za TIG zavarivanje (FC-TIG)

Konvencionalni TIG postupak ima određene nedostatke:

- Niska produktivnost
- Relativno plitka penetracija
- Visoka osjetljivost na uvjete na površini i kemijski sastav osnovnog metala

Ovim nedostacima želi se stati na kraj novim inačicama TIG zavarivanja. Iako automatizirano TIG zavarivanje vrućom žicom može stati na kraj ovim nedostacima, njegovu primjenu ograničava magnetsko puhanje koje smanjuje depozit rastaljene žice te to što penetracija ne mora biti poboljšana. Drugi razvijeni postupak je visokoučinski A-TIG postupak, s aktivirajućim topiteljem, koji je usmjeren prvenstveno na nehrđajuće čelike tako da se ne primjenjuje za ostale

Fakultet strojarstva i brodogradnje _____ Domagoj Delač
legure čelika. Ovim nedostacima pokušalo se stati na kraj upotrebom praškom punjenih žica tzv. FC-TIG. Ovom metodom dobivaju se visoko kvalitetni zavari s produktivnošću koja se može mjeriti s konvencionalnim MIG/MAG postupcima.

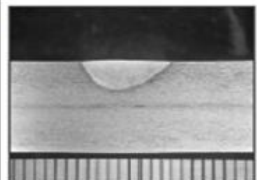
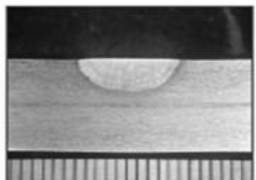
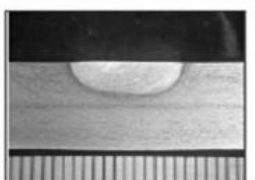
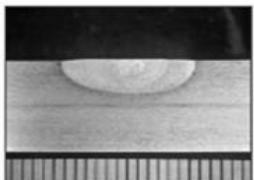
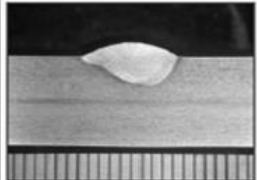
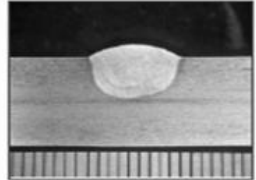
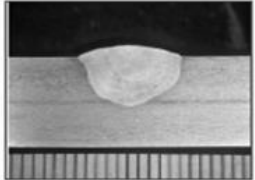
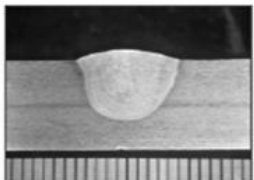
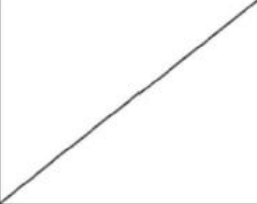
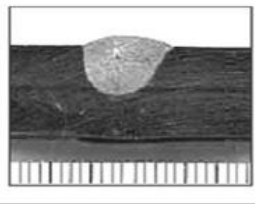
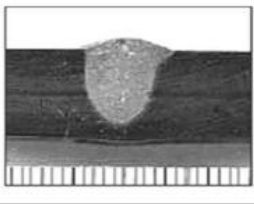
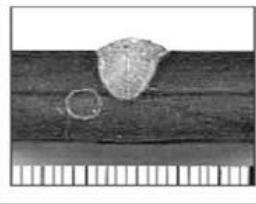
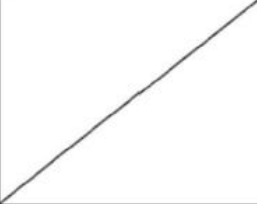
Jedan od razloga veće penetracije kod FC-TIG postupka, nego kod konvencionalnog u većoj je gustoći elektrona zbog isparivanja atoma elemenata sadržanih u praško punjenoj žici.

Prednosti FC – TIG postupka naspram konvencionalnih su sljedeći:

1. Znatna poboljšanja sastava i mikrostrukture zavara zbog povećane učinkovitosti prijenosa legirajućih elementa.
2. Zavar dobrih svojstava, bez pukotina ili poroznosti
3. Značajan porast penetracije zavara u usporedbi s TIG zavarivanjem hladnom žicom
4. Visoka stopa depozita dodatnog materijala, oko 11 kg/h

Zaključno, FC – TIG zavarivanje može značajno poboljšati kvalitetu zavara te penetraciju i stopu depozita dodatnog metala za zavarivanje [?].

Na slici 6.1. usporedba je u penetraciji između TIG, FC – TIG i A- TIG s punom žicom. [15]

	Struja : 150 A	175 A	200 A	230 A
TIG zavarivanje bez dodatnog materijala				
TIG zavar s praškom punjenom žicom				
A - TIG s punom žicom				
				
Osnovni metal: SUS304 L, brzina zavarivanja: 65mm/min, stopa dodavanja žice : 0 - 4 g/min				

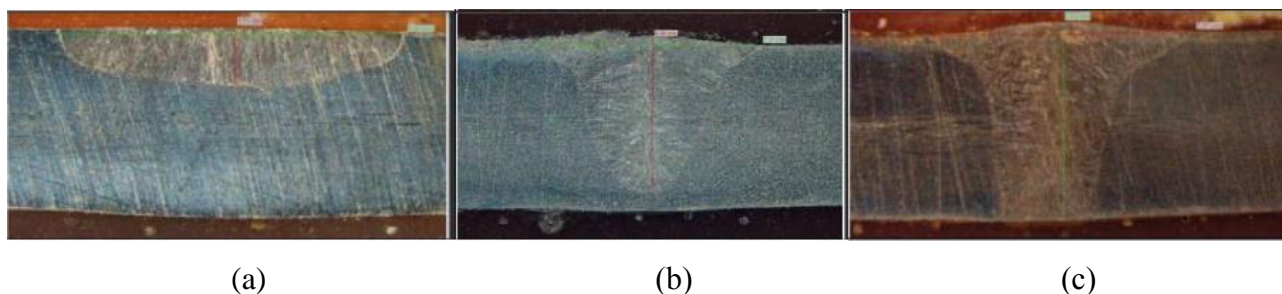
Slika 6.1. Usporedba penetracije između TIG, FC – TIG i A- TIG s punom žicom [9]

6.3. Visokoučinsko TIG zavarivanje s aktivirajućim praškom

Ova varijanta postupka uspostavljena je s ciljem da se poveća efikasnost penetracije kod procesa TIG zavarivanja. Ova varijanta koristi aktivirajući prašak, a naziv je prema tome dobila od *Active Flux TIG*, A-TIG. Osim ovog načina koji koristi površinski aktivirajuće elemente, veća penetracija i brzina zavarivanja još se mogu dobiti oblikom zavarivačke struje i upotrebom smjesa s oksidirajućim plinom kao što su $\text{Ar} - \text{O}_2$ i $\text{Ar} - \text{CO}_2$ (tzv. TAG, ISO 4063 – 147).

A-TIG je proces u kojem je zbog suženja luka i modificiranog tijeka taljenja (Marangonijev efekt) u kupci zavar penetracija u osnovnom materijalu znatno dublja nego kod konvencionalnog TIG zavarivanja. Kombinacija dublje penetracije i viših brzina zavarivanja povećava efikasnost zavarivačkog procesa.

Na slici 6.2. prikazana su tri slučaja zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika TIG postupkom sa 100 % argona pri istoj struji i brzini zavarivanja. Pri slučaj je konvencionalno TIG zavarivanje bez upotrebe aktivirajućeg praška (a). U slučaju (b) upotrebljen je aktivirajući prašak sastava: titan, silicij, te krom-trioksid. Lice zavar je nešto suženo dok je penetracija povećana čak tri puta za iste parametre. Treći slučaj (c) primjena je aktivirajućeg praška i visokofrekventnog TIG postupka s impulsnim strujama čime je smanjena duljina luka što je uzrokovalo još malo uži zavar, ali i daljnje protaljivanje.



Slika 6.2. Utjecaj aktivirajućeg praška na protaljivanje kod TIG zavarivanja [16]

Kao što je već navedeno, upotreba A-TIG postupka dovodio do povećanja penetracije i brzine zavarivanja. Kako je protaljivanje A-TIG postupkom veće tri puta, to se može za iste parametre iskoristiti za povećanja brzine za oko tri puta.

Korištenje praška može se upotrebljavati s istim uređajima kao kod konvencionalnog zavarivanja, a prašak djeluje tako što koncentrira luk i mijenja tok kupke zavar koji ovisi o gradijentu površinske napetosti. Temperaturna ovisnost površinske napetosti može se modificirati određenim kemijskim elementima kao što su kisik, sumpor, titan, selenij, antimon, telurij itd.

Zaključno, djelovanje praška svodi se na:

- Promjenu Marangonijevog toka uslijed promjene gradijenta površinske napetosti prema:

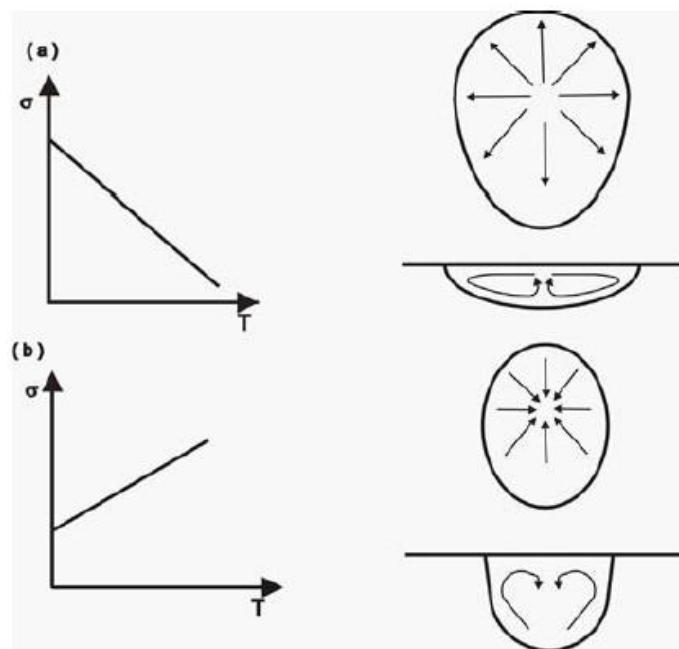
$$\gamma = \frac{\partial \sigma}{\partial T}$$

- Efekt sužavanja luka

S negativnom vrijednošću γ , hladnije margine kupke zavara pokazuju veću površinsku napetost, nego centar kupke, s toga je tok usmjeren od centra prema van što uzrokuje širok i plitak zavar.

S pozitivnom vrijednošću γ tok kupke zavara usmjeren je od rubova prema centru što će za iste parametre dovesti do užeg i dubljeg zavara.

Slika 6.3. Pokazuje Marangonijev tok u ovisnosti o gradijentu površinske napetosti za slučaj bez upotrebe površinski aktivatora (a) i slučaj s površinskim aktivatorom (b) [16]



Slika 6.3. Marangonije tok u kupki zavara [16]

6.4. K-TIG -visoko penetracijski postupak- „keyhole”

K-TIG je automatizirani visokobrzinski, jedno prolazni proces s punom penetracijom koji eliminira potrebu za dodatnim materijalom, pripremom rubova ili vještinama zavarivača. Proizvodi zavare bez greške brzinama većim do 100 puta u odnosu na konvencionalni TIG postupak za materijale debljine do 16 mm. K u nazivu označava *keyhole*, odnosno ključanicu pa bi se postupak mogao nazvati TIG zavarivanje ključanicom.

K-TIG je visokoučinska varijanta TIG postupka bez dodatnog materijala koja stvara zavar u jednom prolazu. Rezultat je zavar koji se sastoji samo od osnovnog materijala, doslovno

Fakultet strojarstva i brodogradnje _____ Domagoj Delač
eliminirajući mogućnost uključaka, poroznosti te drugih grešaka. Nema potrebe za naknadnom obradom korijena ili lica zavora, čišćenjem ili brušenjem.

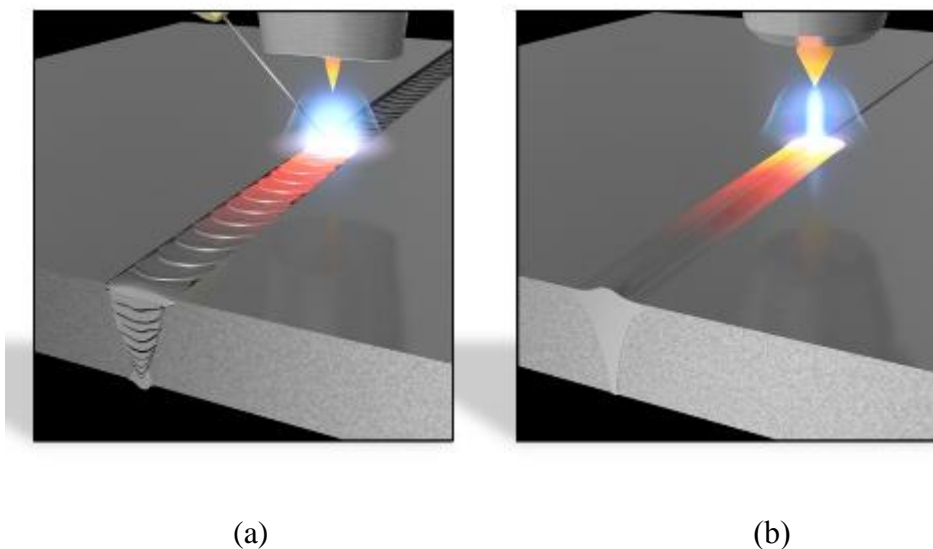
U usporedbi s drugim sličnim postupcima kao npr. zavarivanje laserom, plazmom ili elektronskim mlazom postupak je tolerantan na nesavršenosti spoja i umjerene nesavršenosti oblika luka. Ključanica je veoma stabilna tako da nema potrebe za balansiranjem između sila električnog luka i površinske napetosti. Ključanica se zbog prirode procesa sama korigira.

K-TIG postupak je jednostavan za uporabu, struktura luka i ključanica se razvijaju spontano i održavaju se automatski kontrolnim sustav kroz proces zavarivanja. Zbog svoje jednostavnosti niski su troškovi održavanja, sustav je robustan i pouzdan. Koristi se samo jedan zaštitni plin čiji protok nije kritičan te nema potrebe za optikom, mlaznicama itd. Sustav je jednostavan i sastoji se od kontrolnog sustava, izvora struje, sustava za hlađenje vodom, dodavača žice i gorionika.

Postupak koristi izvor struje od 1000 A, što je znatno više nego što je potrebno za bilo koji proces ključanicom, a intermitencija je 100% dok je kod plazme oko 60% prema podacima proizvođača. [18]

Postupak se može koristiti za širok spektar materijala i široku upotrebu. Brzine za materijale debljine 3 mm su do 1000 mm/min, dok su kod materijala s debljinom 16 mm brzine do 200 mm/min. [18]

Na slici 6.4. prikaz je konvencionalnog TIG zavarivanja (a) i K-TIG zavarivanja (b)



Slika 6.4. Usporedni prikaz konvencionalnog i K-TIG postupka [17]

6.5. Automatizirano TIP TIG zavarivanje

Razvoj ovog postupka, također je potaknut nedostacima konvencionalnog TIG postupka, prvenstveno s gledišta male produktivnosti i nemogućnosti automatizacije. Primijenjena tehnološka rješenja, uređaja za dodavanje dodatnog materijala, kod TIP TIG postupka omogućavaju povećanje produktivnosti i integraciju u automatizirane sustave.

TIP TIG zavarivanje je modernizirana varijanta TIG postupka zavarivanja uz primjenu automatskog dodavanja žice tj. dodatnog materijala koje se sastoji od dvije komponente. Žica za zavarivanje se primarno giba kontinuirano prema naprijed u smjeru zavora (kao kod MIG/MAG postupka) te se na to gibanje integrira sekundarno linearno gibanje „naprijed-nazad“ koje proizvodi dodavač žice preko mehaničkog sustava. Kinetička energija tog dinamičkog gibanja umanjuje utjecaj površinske napetosti taline što omogućava bolje spajanje i miješanje osnovnog i dodatnog materijala dok nečistoćama i plinovima omogućava izlaz iz rastaljenog metala. Depozit dodatnog materijala može se povećati i do 50% kad se radi o varijanti s vrućom tj. predgrijanom žicom. Dinamički efekti gibanja žice osiguravaju stabilan i upravljiv zavarivački proces. Brzina žice i oscilatorno gibanje naprijed-nazad su kontinuirano podesivi i njima je moguće nezavisno upravljati. [19]

Uređaj za dodavanje dodatnog materijala za TIP TIG zavarivanje omogućuje:

- zavarivanje s manjim parametrima, zbog smanjene površinske taline kupke zavora
- mogućnost podešavanja parametara preko upravljačke ploče čime se utječe na oblik i geometriju zavora te stabilnost procesa
- veći depozit dodatnog materijala

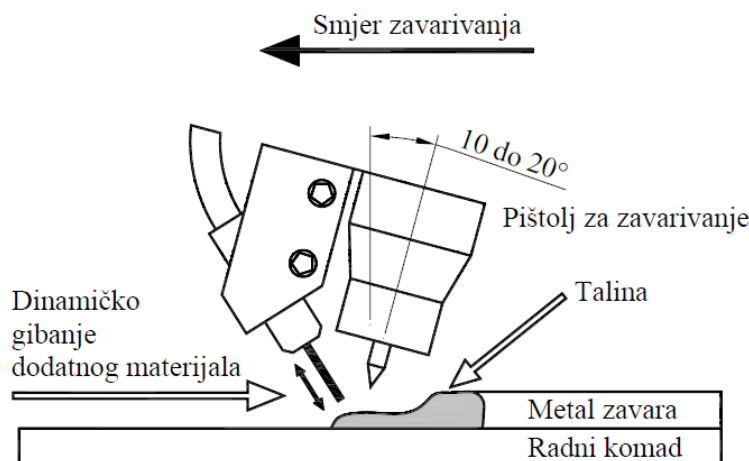
Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja mogu se vrlo efikasno zavarivati konstrukcijski čelici, nehrđajući čelici (feritni, austenitni i austenitno-feritni), aluminij i njegove legure, titan itd.

Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja dobiva se slijedeće:

- u odnosu na klasični TIG znatno veći depozit,
- visoka kvaliteta zavora,
- dobar estetski izgled i geometrija zavora bez potrebe za naknadnom obradom,
- smanjeni unos topline u radni komad što rezultira smanjenjem deformacija radnog komada te manji negativni utjecaj na mikrostrukturu.

TIP TIG postupak se zbog svojeg koncepta vrlo lako automatizira, a efikasnost mu raste uporabom varijante s vrućom žicom. Zbog relativno nižeg unosa topline minimalizirano je i stvaranje metalnih para i plinova. [19]

Najčešće primjenjivana tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja prikazana je na slici 6.5. Pištolj za



Slika 6.5. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja [19]

TIP TIG zavarivanje s hladnom žicom

Zavarivanje s hladnom žicom je jednostavnija varijanta TIP TIG postupka. Energija unosa tj. količina unešene topline u zavareni spoj je niža nego u usporedbi s varijantom koja koristi predgrijavanje žice, pa je stoga i efikasnost i brzina postupka manja.

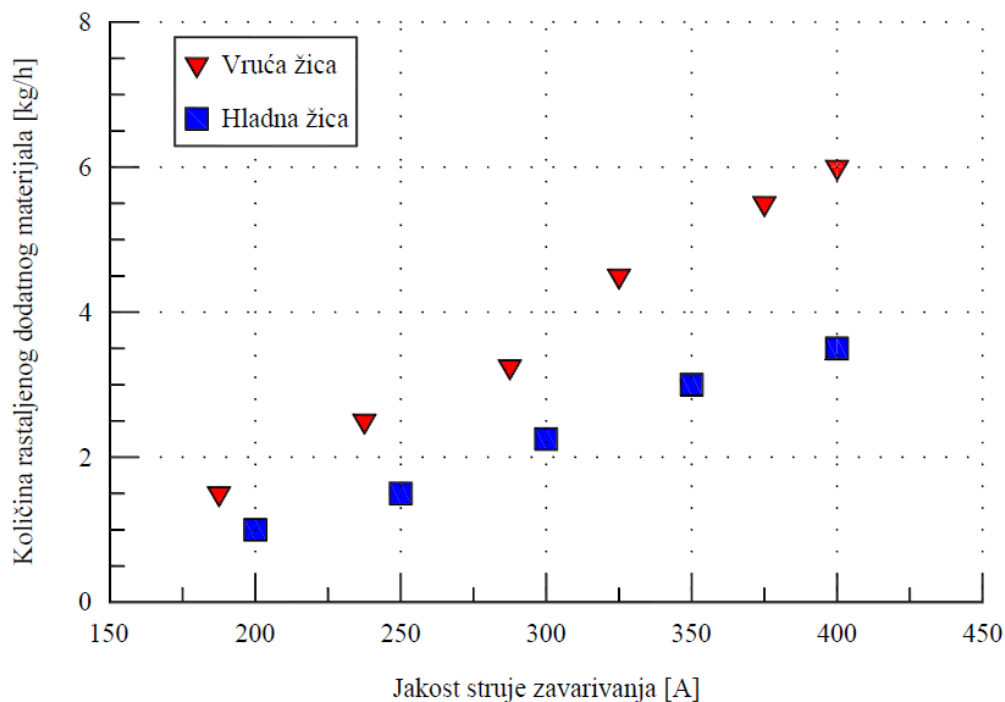
Bitno je napomenuti da se primjenom ove varijante TIP TIG postupka mogu ostvariti brzine zavarivanja kao i primjenom impulsnog MIG zavarivanja. Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja s hladnom žicom dobije se zavar izvrsne kvalitete i izgleda koji posjeduje izvrsna mehanička i metalurška svojstva, a također smanjeni su troškovi jer nema prskanja kapljica nataljenog metala pa niti nema potrebe za naknadnom obradom zavarenog spoja. [19]

TIP TIG zavarivanje s vrućom žicom

Osnovna razlika između TIP TIG postupka zavarivanja s vrućom žicom i TIP TIG postupka zavarivanja s hladnom žicom jest u predgrijavanju žice tj. dodatnog materijala. Žica se predgrijava efektom nastanka Joulesove topline, odnosno prolaskom električne struje, koju proizvodi dopunski izvor struje, kroz dodatni materijal (žicu). Predgrijavanjem se dodatnom materijalu povisuje temperatura pa je za njegovo taljenje potrebna manja energija električnog luka. Ova prednost se u praksi najviše očituje u potpunoj kontroli početne i završne faze zavarivanja. TIP TIG postupak zavarivanja s vrućom žicom primjenjuje se za zavarivanje svih faza spoja (korijenski prolaz, popuna, završni prolaz).

Na slici 6.6. prikazana je usporedba depozita kod TIP TIG postupka s hladnom i vrućom žicom.

Za istu struju zavarivanja kod varijante s vrućom žicom unesena je veća količina topline u zavar što se može iskoristi za veću količinu nataljenog materijala, odnosno povećanje brzine zavarivanja ili za smanjivanje parametara. U usporedbi s hladnom žicom pri istoj brzini dodavanja žice i istoj struji zavarivanja, količina dodatnog materijala kod varijante s vrućom žicom se može još dodatno regulirati jačinom struje kojom se grije žica čime se utječe ili na brzinu procesa ili na količinu nataljenog materijala. [19]



Slika 6.6. Usporedba TIP TIG postupka s vrućom i hladnom žicom [19]

6.6 Impulsna struja kvadratnog oblika

Jedan od napredaka u TIG zavarivanju impulsna je struja kvadratnog oblika. Ona olakšava zavarivanje i smanjuje pogreške. Niža struja procesa pogodna je za primjenu u industrijama kod zavarivanja tanjih materijala. Široki rang izlazne struje od 5 do 315 A sa jako stabilnim i mirnim lukom omogućuje široku upotrebu.

Ova tehnologija upotrebljava izmjeničnu struju kvadratnog oblika umjesto dosadašnjeg konvencionalnog sinusoidnog oblika. S tradicionalnim AC sinusoidnim valom postupni je prijelaz od maksimalne pozitivne vrijednosti do vrijednosti nule kada dolazi do gašenja luka nakon čega slijedi daljnji prijelaz prema maksimalnoj negativnoj vrijednosti. Postepeno padanja i dizanje otežava ponovno paljenje luka nakon što se gasi na vrijednosti 0 što dovodi do nestabilnosti procesa. Nasuprot tome, umjetno napravljeni val kvadratnog oblika mijenja valni

oblik vrlo brzo od maksimalno pozitivno na maksimalnu negativnu dopuštenu vrijednost. Ovo brzo kretanje znači da se ovaj oblik vala kreće brže kroz točku 0 što znači da je lakše paljenje luka, stoga i stabilniji luk.

Izmjenična struja kvadratnog oblika odlična je za zavarivanje materijala gdje je važno čišćenje i penetracija. Manipulacijom polova moguće je odrediti karakter procesa, tako da se s više pozitivne struje dobiva bolji efekt čišćenja, dok više negativne struje dovodi do bolje penetracije. Poboljšane karakteristike čišćenja i penetracije čiste površinu osnovnog metala od oksida i omogućuju bolje spajanje osnovnog metala.

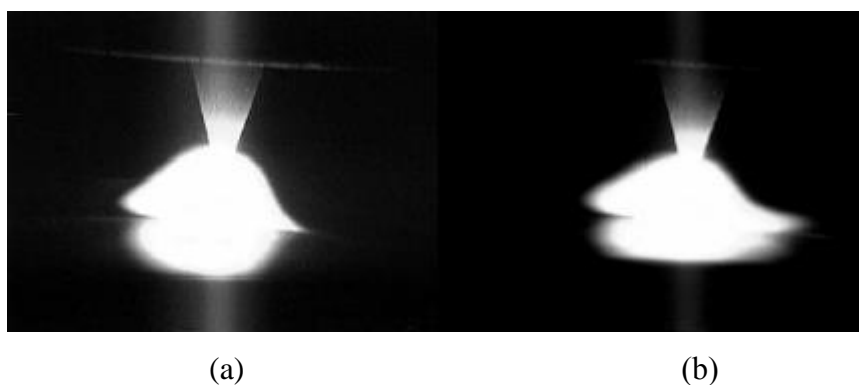
Kod istosmjerne struje jedna od prednosti je izbjegavanje kratera na kraju procesa. Sa konvencionalnim uređajima odabire se jedno od tri područja: nisko, srednje i visoko. Zbog lakše uspostave luka, najčešći odabir kod zavarivača područje je sa strujama srednje vrijednosti zbog čega se stvaraju krateri na kraju procesa jer je područje iznad minimalne vrijednosti struje. Kod izvora struje sa strujom impulsnog oblika, bez obzira na odabrano područje, uređaj će uvijek stvarati luk s najmanjom strujom uređaja, najčešće od 2 do 12 A, a proces će se nastaviti na maksimalno odabranoj struji. Za razliku od konvencionalnih uređaja koji uvijek završavaju proces u odabranom području, kod uređaja s impulsnom strujom završetak je na najmanjoj struji uređaja. Potreba za većom strujom pri paljenju luka može se dobiti ili skupim uređajima gdje postoji opcija namještanja početne i minimalne struje (najbolje od tradicionalnih i suvremenih uređaja) ili opcijom na kontrolnoj ploči ili pomoću nožne pedale koja nudi mogućnost da brzo podigne struju za vrijeme paljenja luka. [20]

6.7. Visoke frekvencije impulsnog zavarivanja

Iako se kod većih frekvencija praktički ne vidi razlika u temperaturi elektrode između impulsne i pozadinske struje te je temperatura slična onoj kao i kod običnog TIG postupka, visoke frekvencije se koriste jer utječu na oblik električnog luka. Povećanjem frekvencije od nekoliko Hertza do 35 kHz električni luk se sužava i poprima skoro cilindrični oblik, pri čemu raste tlak električnog luka. Tlak u luku jako raste do otprilike 5 kHz, dok se daljnjim povećanjem frekvencije tlak ne povećava značajno. Osim frekvencije impulsa, rastuća amplituda impulsa struje dodatno osnažuje tlak luka nad kupkom zavara na istoj efektivnoj vrijednosti struje zavarivanja.

Oba parametra, frekvencija i amplituda pulsa struje čine električni luk izrazito krutim. Takva krutost električnog luka omogućuje porast brzine zavarivanja. Kod izrazito visokih brzina zavarivanja dobije se zavareni spoj kontinuiranog vanjskog oblika i dobre penetracije.

Slika 6.7. usporedba je razlike između konvencionalnog TIG zavarivanja i visoko frekventnog kod iste brzine zavarivanja, istog zaštitnog plina i iste struje, odnosno srednje vrijednosti kod visokofrekventnog postupka. Kod TIG zavarivanja bez impulsa (b) vidljive su deformacije obrisa luka u smjeru suprotnom od smjera zavarivanja. Impulsni luk frekvencije 6 kHz (a) ima simetričan i pravilan oblik što ima za posljedicu stabilnost luka. [21]



Slika 6.7. Usporedba formiranja luka kod visokofrekventnog impulsnog TIG zavarivanja i konvencionalnog TIG zavarivanja [21]

6.8. Razvoj plinova

Reducirajući zaštitni plinovi

Iako se kod konvencionalnog TIG zavarivanja koriste inertni zaštitni plinovi, moguće su upotrebe i s reducirajućim učinkom zaštitnog plina dodatkom vodika. Dodatkom vodika, mješavini zaštitnog plina na bazi argona, za istu struju, povećava se energija električnog luka u materijalu koji se zavaruje. Vodik se ponaša kao reducirajući činilac sprečavajući nastajanje oksida i to proizvodi čišće površine zavora. Mješavine argon-vodik koriste se u specijalnim slučajevima kao što su mehanizirano zavarivanje tankostijenih cijevi od nehrđajućeg čelika, u kojima vodik nema štetno metalurško djelovanje kao što je poroznost i pucanje uslijed zaostalog vodika. Povećanje brzine zavarivanja može biti postignuto u gotovo istoj proporciji s količinom dodanog vodika argonu zbog povećanja napona luka. Međutim, količina dodanog vodika ovisi o debljini materijala i vrsti spoja. Pretjerano dodavanje vodika uzrokuje poroznost tako da se koriste mješavine do 35 % vodika. Najčešća uporaba je između 1% i 8% vodika te se koriste za većinu nehrđajućih čelika, nikal-bakar legura i legura na bazi nikala.

Mješavina koja se najviše koristi je ona s 5 % vodika zbog odličnih svojstava i kod tankih i debelih materijala. Uz određene uvjete brzina zavarivanja može biti ista kao i kod zavarivanja uz primjenu helija ili čak 50 % veća nego uz primjenu argona.

Prednosti su: povećana penetracija luka, veće brzine zavarivanja i čistoća površine zavora zbog koje se može koristiti i kod ručnog zavarivanja. [13]

Oksidirajući aktivni filmovi

Osim reducirajućih plinova novom normom definiraju se i zaštita oksidirajućih plinova za TIG zavarivanje. Tim se htjelo doskočiti relativno niskoj penetraciji kod TIG zavarivanja. Postoji nekoliko načina kojim se aktivirajući elementi dodaju kupki zavora. Podešavanjem sastava sirovina, smještanje ili mazanje aktivirajućeg praška na površinu prije zavarivanja te namještanjem koncentracije zaštitnog plina.

Povećanje koncentracije kisika i ugljičnog dioksida u zaštitnom plinu na bazi argona dovodi do povećanja sadržaja kisika u metalu zavora ako su koncentracije manje od 0,6 % volumena. Međutim, kada je koncentracija O_2 ili CO_2 veća od 0,6 % u zaštitnom plinu na bazi argona sadržaj kisika u metalu zavora je od 200 do 250 ppm čime se stvara kontinuirani sloj oksida na periferiji kupke zavora što onemogućava otapanje kisika. Marangonijev efekt koji djeluje prema unutra, prema slici 3. (b), pojavljuje se kad je koncentracija iznad 100 ppm što dovodi do užih i dubljih zavora. Ispod te koncentracije Marangonijev efekt djeluje prema van što pak čini zavar širim i plićim. [22]

7. RAZVOJ PLAZMA ZAVARIVANJA

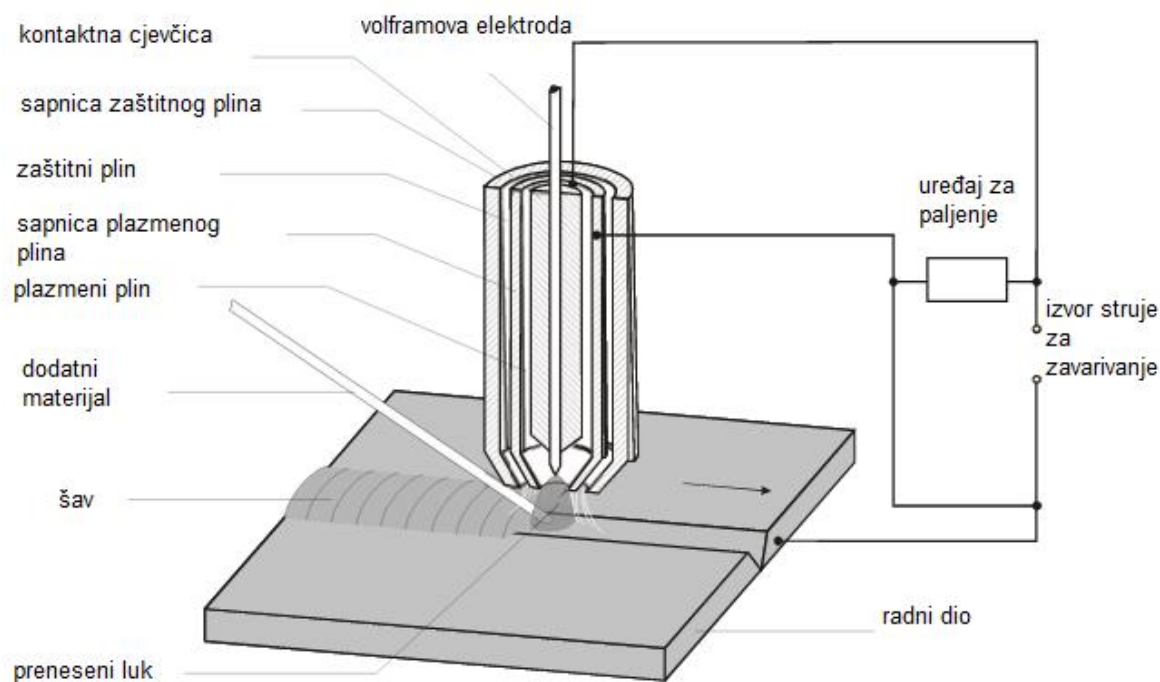
Postupci s plazmom danas imaju jako široku primjenu. Osim konvencionalnog rezanja i zavarivanja, koje je sve više u upotrebi, plazma, se prema [24] još koristi za: žljebljenje, naštrcavanje, navarivanje, zagrijavanje teškoobradivih materijala za obradu odvajanjem čestica u toplom stanju, površinske toplinske i toplinsko-kemijske obrade (nitriranje, cementiranje...), modifikacije površine, inceneracija (spaljivanje) otrovnog otpada i razaranje osnove materijala na sastojke itd. Sve veća upotreba plazme očitala se i na značajnom povećanju varijanti postupaka zavarivanja i rezanja plazmom prema novoj normi.

Iako se plazma rijetko koristi za zavarivanje ona ima veliku mogućnost primjene zbog velikog područja rada. Moderni izvori struje i pripadajuća oprema za plazma zavarivanje uz odgovarajući stupanj automatizacije mogu bitno poboljšati produktivnost i kvalitetu zavarivanja [23]. Plazma je jako povoljna za automatizaciju i robotizaciju. Napredak se koristi za dobivanje veće brzine i veće penetracije uz manje deformacije. Kao postupak koji se razvio iz TIG zavarivanja on na neki način predstavlja njegov visokoučinski razvoj. Prednosti nad TIG postupkom su prema [23] sljedeće:

- Manja mogućnost kontaminacije metala zavara volframom iz elektrode.
- Nema potrebe za čestim brušenjem elektrode zbog otkidanja i trošenja proizašlog zbog kontakta s osnovnim metalom
- Povećana stabilnost procesa obzirom na promjenu visine plazmenog luka
- Veća penetracija i mogućnost kontrole penetracije
- Veća krutost luka
- Veća brzina zavarivanja za istu jakost struje
- Manji unos topline za istu penetraciju (u komparaciji s TIG postupkom) i manja širina ZUT-a)
- Manje deformacije

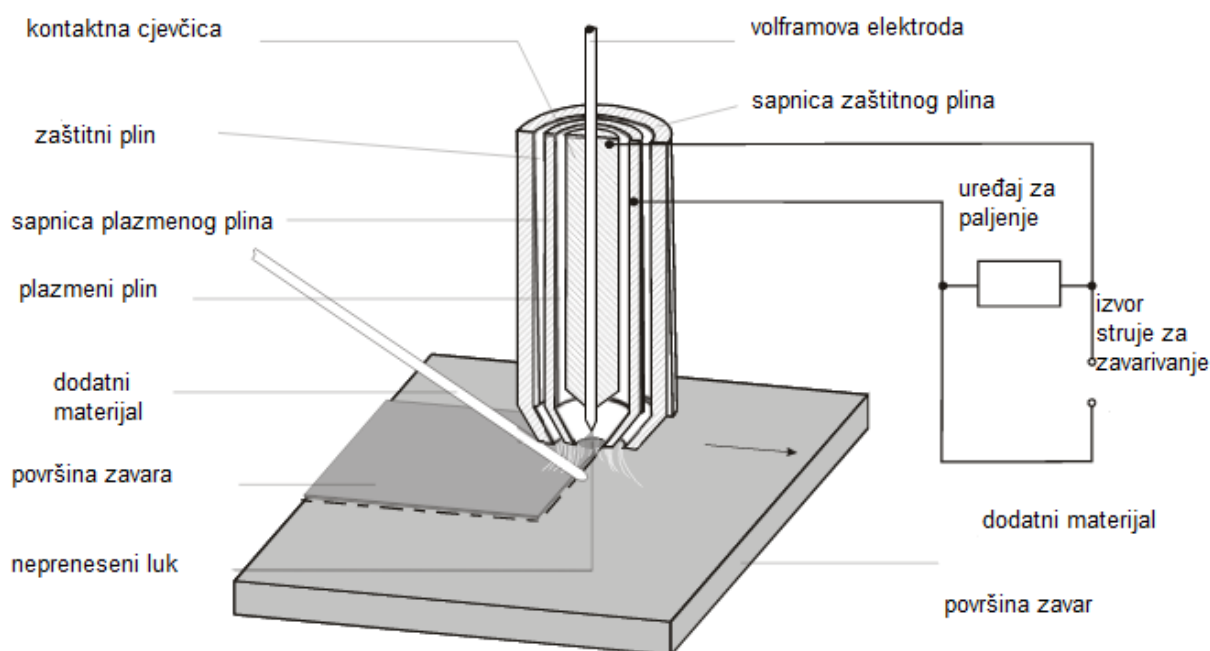
Plazma zavarivanje proizvodi zavar udarom uskoga električnog luka koji se uspostavlja između netaljive elektrode i kupke zavara (preneseni luk) ili između netaljive elektrode i unutrašnje sapnice (nepreneseni luk) [3].

Kod prenesenog luka, slika 7.1., električni luk se uspostavlja između volframove elektrode koja je na negativnom polu i radnog komada koji je na plus polu. Tako je radni komad dio strujnog kruga te se toplina potrebna za taljenje dobiva preko anodne mrlje i preko plazmenog mlaza. Prednosti prenesenog luka su u većoj prenesenoj energiji na radni komad i onaj tip se koristi najčešće za zavarivanje [3]. Ovaj tip omogućuje zavarivanje protaljivanjem.



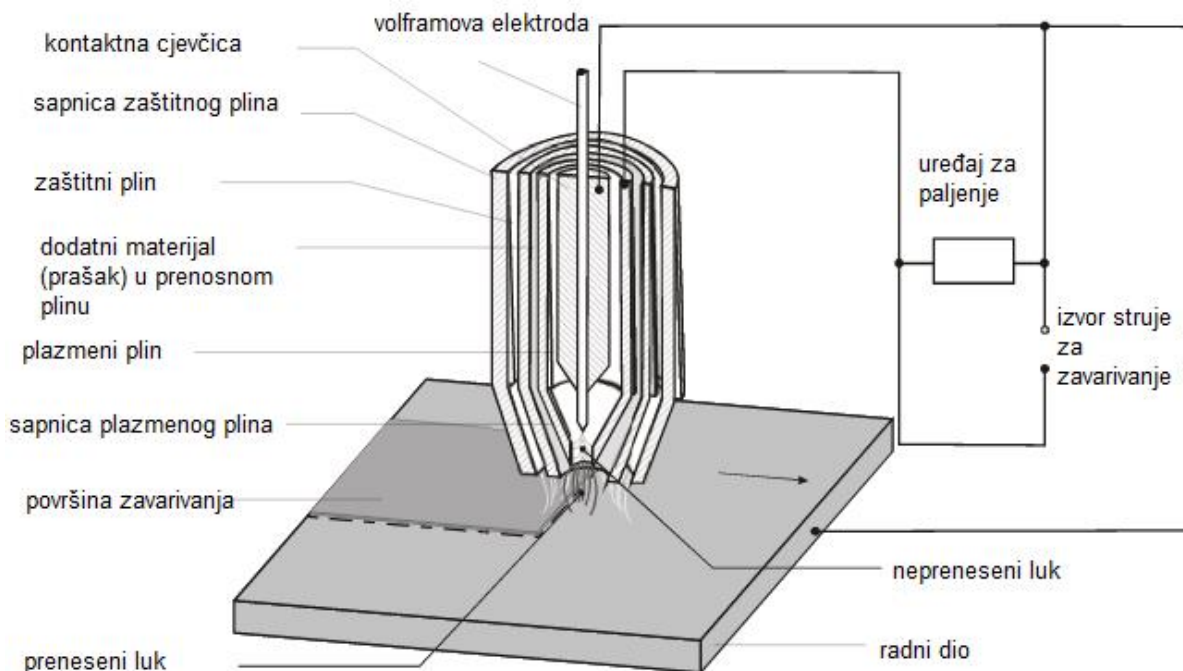
Slika. 7.1. Plazma zavarivanje s prenesenim lukom [25]

Volframova elektroda kod neprenesenog luka, slika 7.2., također je povezan na negativni pol, ali se strujni krug uspostavlja i održava preko unutrašnje sapnice koja je povezana na plus pol. Luk plazme je istisnut kroz sapnicu preko plazmenog plina. Korisna toplina dobiva se jedino preko mlaza plazme. Nepreneseni luk koristi se za rezanje i spajanje radnih komada koji ne prenose struju ili za aplikacije gdje je poželjna relativno niska koncentracija energije [3]. Koristi se za plazma zavarivanje taljenjem, prevlačenje i naštrcavanje. Prema [25] ovaj tip koristi se i za zavarivanje folija.



Slika. 7.2. Plazma zavarivanje s neprenesenim lukom [25]

Još jedan tip plazma zavarivanja koji se definira u novoj normi djelomično je preneseni luk, slika 3., koji je kombinacija obje navedene metode. Ova varijanta procesa koristi se za mikroplazma zavarivanje, za naštrcavanje te spajanje aluminija. Kod naštrcavanja se koristi zbog relativno niskih operativnih troškova, povećane efikasnosti, niske poroznosti i niskog razrjeđivanja supstrata [25].



Slika 7.3. Plazma zavarivanje s djelomično prenesenim lukom [25]

Kod plazma zavarivanja koriste se dva plina. Plazmeni plin koji struji u unutrašnjoj sapnici služi za stvaranje plazme. Plin se ionizira visokofrekventnom strujom visokog napona stvaranjem pilot luka između elektrode i unutrašnje sapnice, a zatim se kroz plazmu ioniziranog plina propušta struja zavarivanja pri čemu se dobiva toplina potrebna za zavarivanje. Plazmeni plin konvergira kroz sapnicu te kao rezultat daje kruti plazmeni luk malog promjera []. Za ovu upotrebu plin mora biti inertan kako ne bi došlo do uništenja elektrode. Za visoke struje, odnosno za procese plazma zavarivanja taljenjem i protaljivanjem, ovisno o osnovnom metalu koristi se plinovi na bazi argona. Za plazma zavarivanje taljenjem za gotovo sve materijale koristi se mješavina 75% Ar – 25% He, dok je za zavarivanje protaljivanjem udio helija manji od 10 %. Kod ovih struja isti se plinovi koriste i za zaštitu. Plazmeni plin kod postupaka s niskom strujom uvijek mora biti argon zbog niske energije ionizacije koja osigurava paljenje pilot luka. Za zaštitu se koriste mješavine argona i helija, a moguća je upotreba i vodika u malim količinama. Zaštitni plin se dovodi kroz vanjsku sapnicu [3].

Plazma ima tri područja rada [23]:

- Mikroplazma zavarivanje (struje do 15 A)
- Plazma zavarivanje taljenjem (struje do 100A)
- Plazma zavarivanje protaljivanje (struje iznad 1000A)

Mikroplazma se koristi za zavarivanje folija i tankih limova debljine od 0,02 do 1 mm. Za većinu aplikacija može se koristiti ručno.

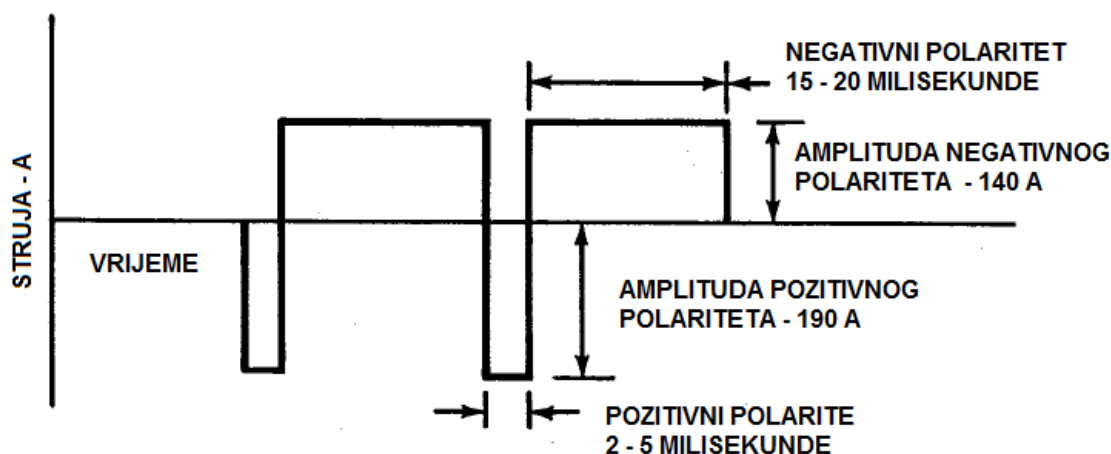
Procesom taljenja zavaruju se materijali kao i kod TIG zavarivanja pa je postupak moguće obavljati ručno. Primjenjuje se za debljine materijala od 0,5 do 3 mm.

Kod zavarivanja protaljivanjem iskorištava se visoka gustoća energije plazme. Ovaj način rada ima jako visoku produktivnost, no zahtjeva veliku preciznost što pak traži preciznu mehanizaciju procesa. Za ovaj se način rada koristi postupak s prenesenim lukom. [23]

7.1. Impulsne struje kod plazma zavarivanja (VPPA)

Za određene primjene nužno je koristiti impulsne struje kod plazma zavarivanja. Za tu upotrebu upotrebljavaju se isti izvori struje kao i kod TIG zavarivanja. Moderni izvori struje za zavarivanje omogućili su primjenu izvora koji generiraju izlaznu struju za zavarivanje promjenjivog polariteta tzv. *VP-variable polarity*. To znači da se na metalnoj elektrodi izmjenjuju pozitivna i negativna perioda određenog trajanja i intenziteta [23].

To se koristi kod plazma zavarivanja protaljivanjem impulsnim strujama kvadratnog oblika, odnosno VPPA, za aluminij. Najpovoljniji slučaj prikazan je na slici 7.4. Pritom je najvažnija varijabla trajanje pozitivnog i negativnog polariteta. Do ovih vrijednosti došlo se empirički. Najbolji rezultati se postižu kada je trajanje negativnog polariteta od 10 do 20 milisekundi i pozitivnog polariteta od 2 do 5 milisekundi. Ako je trajanje negativnog polariteta ispod 2 ms spoj će biti porozan, a trajanje iznad 6ms dovodi do uništavanja elektrode i stvaranja „dvostrukog luka“. Vidljivo je i da je amplituda struje veća kod pozitivnog pola iz razloga što to omogućava bolje čišćenje oksida s površine, a opet osigurava minimalno toplinsko opterećenje elektrode i unutrašnje sapnice. Odgovarajuće čišćenje je postignuto porastom struje od 30 do 80 A.

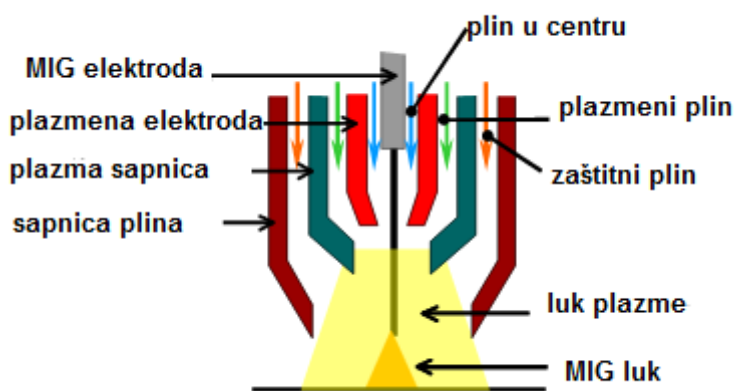


Slika 7.4. Tipična krivulja struje promjenjivog polariteta [3]

7.2. Plazma MIG

Plazma MIG (ISO 4063 – 152) predstavlja posebni hibridni postupak prvobitno osmišljen za zavarivanje aluminija. Ovim postupkom su se htjeli iskoristiti fenomeni luka i izvora topline. Postupkom se povećava snaga taljenja MIG zavarivanja tako što se u luk dodaje luk plazme. Luk plazme predgrijava žicu i osnovni materijal čime se smanjuju defekti prilikom paljenja luka. Na taj način predgrijana žica povećava produktivnost procesa i povećava svojstva taljenja [1]. Također, plazmeni luk stabilizira MIG luk.

Proces zahtjeva gorionik velikih dimenzija tako da proces nije moguć za ručno zavarivanje. Gorionik je za plazma Mig zavarivanje koaksijalne geometrije, u čijem centru se nalazi MIG elektroda, dok je prstenasta elektroda u kojoj se proizvodi luk plazme smještena po opsegu. Slika 7.5. pokazuje shematski prikaz gorionika.



Slika 7.5. Prikaz gorionika za plazma MIG zavarivanje [26]

Plin se sastoji od tri dijela: središnjeg plina za MIG, plazmenog plina i zaštitnog plina. Vrste koje se koriste su argon i helij. [26]

8. ZAKLJUČAK

Iako konvencionalni postupci imaju još uvijek značajnu ulogu u zavarivačkoj praksi prvenstveno zbog svoje rasprostranjenosti, cijene i jednostavnosti korištenja sve teže mogu konkurirati novim postupcima u pogledu efikasnosti, fleksibilnosti, produktivnosti, kvalitete itd. Suvremeni postupci tako npr. kombiniraju kratkospojne i štrcajuće prijenose materijala i tako proširuju područje svoje primjene. Napredak u elektroničkoj industriji omogućava oblikovanje struje prema potrebi zavarivačkog procesa tako da danas više i ne govorimo o klasičnim istosmjernim i izmjeničnim strujama. Sve to dovodi do mnogih mogućnosti, a pozitivno utječe i na energetske učinkovitost i zaštitu okoliša. Trendovi su takvi da s daljnjim napretkom zavarivačke tehnologije ćemo sve manje moći u dosadašnjim granicama jednoznačno definirati elektrolučne postupke. Ubrzani razvoj na uklanjanju nedostataka i poboljšavanju približava procese u ona područja koja su do sad bila nezamisliva. Tako da danas možemo govoriti o automatiziranom TIG-u, visokoučinskim postupcima MIG/MAG zavarivanja koji su po količini depozita usporedivi s EPP-om itd.

Daljnja područja razvoju su sljedeća:

- Izvori struje
- Specifični dodatni materijali
- Osjetilni sustavi (senzorika)
- Programski sustavi za modeliranje i simulacije
- Adaptivna kontrola procesa i praćenje parametara
- Razvoj i inovacije samih postupaka zavarivanja

9. LITERATURA

- [1] ...; *ISO 4063 : 2009 – Welding and allied processes – Nomenclature of processes and reference numbers*, BSI, 2009.
- [2] Gangur, S; *ISO : 4063 Nomenclature of welding and allied processes – chronological overview (1978 – 2011)*, <http://www.scribd.com/doc/121696023/ISO-4063-The-chronological-overview-of-nomenclature-system-ISO-4063-for-welding-and-allied-processes> (20.08.2014)
- [3] O'Brien, Annette (ur.); *Welding Handbook, Volume 2 Welding Processes*, 8. izdanje, American Welding Society, Miami, 2000.
- [4] Norrish, J; *Process modification in gas metal arc welding for enhanced performance*, Australasian Welding Journal - Welding Research Supplement, 58 (First Quarter), 2013., 33-38.
- [5] Scotti, A; Ponomarev, V.; Lucas, W; *A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding*, Journal of Materials Processing Technology 212, 2012., 1406-1413
- [6] Norrish, J.; *Process control and automation developments in welding*. Trends in Welding Research, Proceedings of the 8th International Conference, Springer, Berlin, 2009., 17-24
- [7] Dzelnitzki, Dirk : *Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja*, časopis Zavarivanje, Zagreb, siječanj- travanj 2012./god. 55.
- [8] Dzelnitzki, D.: *Increasing the deposition volume or the welding speed? -Advantages of heavy-duty MAG welding*, EWM HIGHTEC WELDING GmbH, Muendersbach, 2000.
- [9]... : *Strojevi i oprema za zavarivanje*, podloge, Zagreb, 2013, http://www.fsb.unizg.hr/atlas/upload/newsboard/05_12_2013__19939_STROJEVI_I_OPREMA_ZA_ZAVARIVANJE_ZK_PiO-1.pdf (05.09.2014.)
- [10] Wiktorowicz, R. Melton, G.: *Shielding Gas Selection for Controlled Dip Transfer (Short Arc) Welding*, TWI Member Publication, Cambridge, August 2013.
- [11] ...: *CSC MIG Weld Process Controlle* <http://pdf.directindustry.com/pdf/jet-line-engineering/csc-mig-weld-process-controller/27577-54392.html> (15.09.2014.)
- [12] Budig, B.; *EWM – forceArc: Novi concept prijenosa za MIG/MAG zavarivanje*, časopis Zavarivanje, Zagreb, siječanj- travanj 2012./god. 55.
- [13] O'Brien, Annette (ur.); *Welding Handbook, Volume 2*, 9. izdanje, American Welding Society, Miami, 2008.
- [14] ...; *Selection and Preparation Guide for Tungsten Electrodes*, Miller <http://www.millerwelds.com/resources/articles/tungsten-electrode-guide> (16.09.2014.)
- [15] Yan, B.; *Flux-Cored-Wire TIG Welding*, Tianjin Steel Inc., P. R. China
- [16] KÖVEŠ, A; *High-Productivity A-TIG Welding*, 4. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje TEHNOLOGIČNA PRIMJENA POSTUPAKA ZAVARIVANJA I

ZAVARIVANJU SRODNIH TEHNIKA U IZRADI ZAVARENIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, Slavonski Brod, 2007.

[17] ...; *K-TIG Brochure*, 2013. <http://www.k-tig.com/wp-content/uploads/2013/03/K-TIG-Brochure.pdf> (15.09.2014)

[18]...; *K-TIG vs K-PAW*; <http://innovativewelding.com.au/wp-content/uploads/2013/06/K-TIG-vs-K-PAW.pdf> (15.09.2014)

[19] Kralj, S; Kožuh Z.; Garašić I.; Panjković V.; *Automatizirano TIG zavarivanje*, 5. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje, ROBOTIZACIJA I AUTOMATIZACIJA U ZAVARIVANJU I OSTALIM TEHNIKAMA, Slavonski Brod, 2009.

[20] Klingman, D.; *New square-wave power sources live up to their promise of improved weldability when welders become familiar with their unique characteristics*, <http://www.aws.org/wj/9-98article/klingman.html> (15.09.2014)

[21] Dzelnitziki, D.: *TIG-Direct-Current Welding with High-Frequency Pulses, an Interesting Process Variant*, EWM Hightec Welding, 2000.

[22] Shanping, L.; Hidetoshi, F.; Kiyoshi N.; *A Marangoni convection and weld shape variations in Ar–O₂ and Ar–CO₂ shielded GTA welding*, Materials Science and Engineering A 380, 2004, 290–297

[23] Kralj, S; Kožuh Z.; Garašić I.; *Specifičnosti i primjena plazma zavarivanja*, 6. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SUVREMENE TEHNOLOGIJE I POSTUPCI PRI IZRADI TLAČNE OPREME, ZAVARENIH METALNIH KONSTRUKCIJA I PROIZVODA, Slavonski Brod, 2011.

[24] Samardžić, I.; *Plazma rezanje, predavanja*, Slavonski broj. <http://www.scribd.com/doc/17241408/REZANJE-PLAZMOM> (16.09.2014)

[25]...; *4.TIG Welding and Plasma Arc Welding* <http://www4.hcmut.edu.vn/~dantn/WT/WT1-c4.pdf> (16.09.2014.)

[26] Skupina autora: *Application of Plasma-MIG Hybrid Welding to Dissimilar Joint between copper and steel*, IIW Doc. No.XII-1972-09., 2009